



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

### Optimalizace tvaru mazací mezery hydrodynamického ložiska s využitím metamodelování

### Lubricant gap shape optimization of the hydrodynamic thrust bearing using the metamodeling

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

Jan Příbyl

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. Martin Jonák, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2019

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Bc. Jan Příbyl
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Martin Jonák
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Optimalizace tvaru mazací mezery hydrodynamického ložiska s využitím metamodelování**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá optimalizací tvaru mazací mezery axiálního ložiska za účelem zajištění požadované únosnosti a minimalizaci třecích ztrát. Během řešení práce bude autorná základě vypracované rešerše sám vytvářet potřebné výpočtové modely i metamodely. Předpokládá se, že autor využije různých technik metamodelování a vytvoří sérii kvalitativně odlišných metamodelů a zhodnotí vhodnost jejich použití pro danou aplikaci. Získané výsledky budou ověřeny pomocí kontrolní optimalizace přímo nad výpočtovým modelem.

Cíle diplomové práce:

Zpracujte rešerši zabývající se problematikou modelování proudění viskózních tekutin tenkými mezerami.

Dále zpracujte rešerši na téma metamodelování.

Vytvořte základní výpočtový model proudění oleje v mazací vrstvě axiálního ložiska turbodmychadla.

Nad výpočtovým modelem vytvořte dle pokynů vedoucího práce sérii metamodelů, zhodnoťte jejich kvalitu a proveďte optimalizaci.

Dále proveďte diskuzi výsledků získaných aplikací kvalitativně různých technik metamodelování.

Seznam doporučené literatury:

STACHOWIAK, G. W., BATCHELOR, A. W. Engineering Tribology. 3. vyd. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0-7506-7836-4.

NGUYEN-SCHÄFER, H. Rotordynamics of Automotive Turbochargers. Second Edition. Ludwigsburg, Germany: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-17643-7.

SIMPSON, T. W.; POPLINSKI, J. D.; KOCH, P. N.; ALLEN, J. K. Metamodels for Computer-based Engineering Design: Survey and recommendations. In Engineering with Computers. Volume 17, Issue 2, Jul 2001, Pages 129-150. ISSN 1435-5663.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



## ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je optimalizovat tvar mazací mezery axiálního ložiska turbodmychadla s pomocí metamodelování. Práce je nejprve zaměřena na vysvětlení optimalizace a metamodelování, popis jednotlivých technik metamodelování a popis turbodmychadla se zaměřením na mazání axiálního ložiska. V praktické části je uveden výpočtový model průtoku mazací mezerou, program použitý pro sestavení metamodelu a vyhodnocení jednotlivých technik. Konkrétně, při tvorbě metamodelů byly využity metody: responzní plochy a kriging.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Metamodelování, optimalizace, proudění viskózních kapalin, turbodmychadlo, lubrikace axiálního segmentového ložiska

## ABSTRACT

The aim of my diploma thesis is to optimize the gap shape of a turbocharger thrust (axial) bearing using the metamodeling. In its first part, the thesis focuses on introduction of optimization and metamodeling, description of different metamodeling techniques and description of a turbocharger with focus on lubrication of thrust bearing. The second part contains a calculation model of flow through the lubrication gap, use of the techniques for compiling a metamodel and the evaluation of individual techniques. Specifically, the methods used are response surfaces and kriging.

## KEYWORDS

Metamodeling, optimization, viscous liquids flow, turbocharger, thrust pad bearing lubrication



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PŘIBYL, J. Optimalizace tvaru mazací mezery hydrodynamického ložiska s využitím metamodelování. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Jonák.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Martina Jonáka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Jan Příbyl



## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych tímto poděkovat svému vedoucímu, panu Ing. Martinu Jonákovi, Ph. D. za jeho pomoc, rady a připomínky při tvorbě této závěrečné práce. Také bych chtěl poděkovat svým rodičům, přítelkyni, přátelům a všem, kteří mě podporovali po celou dobu studia.



## OBSAH

Úvod.....	9
1 Optimalizace .....	10
1.1 Metamodelová optimalizace návrhu .....	11
2 Metamodelování.....	12
2.1 Návrh experimentu (DoE).....	13
2.2 Techniky metamodelování .....	14
2.2.1 Lineární regresní model (responzní plochy) .....	14
2.3 Kriging.....	16
2.4 Radiální bazové funkce (RBF).....	17
2.5 Neuronové sítě .....	18
3 Turbodmychadlo .....	19
3.1 Popis turbodmychadla .....	19
3.1.1 Stavba turbodmychadla .....	20
3.1.2 Regulace turbodmychadla .....	21
3.2 Ložisková soustava turbodmychadla .....	23
3.2.1 Radiální ložiska .....	23
3.2.2 Axiální ložiska .....	24
Axiální zatížení.....	24
3.3 Mazací soustava turbodmychadla.....	25
4 Proudění tekutin - hydrodynamika.....	27
4.1 Proudění reálných kapalin .....	28
4.1.1 Rovnice proudění skutečné kapaliny .....	29
4.1.2 Hydrodynamické mazání .....	31
4.2 Proudění viskózních tekutin tenkými mezerami .....	32
4.2.1 Proudění mezi rotující součástí a plochou.....	32
4.2.2 Mazání axiálního ložiska (Thrust bearing).....	36
5 Výpočtový model .....	38





6	Metamodel.....	42
6.1	Optimalizační algoritmy .....	42
6.1.1	Responzní plochy .....	42
6.1.2	Kriging .....	42
6.2	Návrhový prostor .....	43
6.2.1	Responzní plochy .....	43
6.2.2	Kriging – Latinská hyperkostka .....	43
6.3	Hodnocení kvality technik .....	43
6.4	Testovací funkce pro sestavení metamodelu .....	44
6.4.1	Technika responzních ploch .....	44
6.4.2	Technika kriging.....	45
6.5	Testování techniky kriging na výpočtovém modelu ložiska.....	47
7	Výsledky .....	49
7.1	Responzní plochy .....	49
7.1.1	Plně faktoriální prostor.....	49
7.1.2	Haltonova sekvence .....	50
7.2	Kriging.....	51
8	Diskuze .....	53
8.1	Technika responzních ploch.....	53
8.2	Technika kriging .....	53
8.3	Přímá optimalizace pomocí genetického algoritmu .....	53
	Závěr .....	54
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	64
	Seznam příloh .....	66



## ÚVOD

První část práce se zabývá vysvětlením optimalizace a metamodelování.

Optimalizace je proces, při kterém se zaměřujeme na získání nejlepšího možného výsledku, z hlediska nejenom ceny, ale také efektivity, kvality a časové náročnosti, při splnění všech zadaných podmínek. Pokud se na proces optimalizace podíváme matematicky, hledáme globální extrém funkce, která může být omezená. Optimalizace je proces používaný ve všech odvětvích průmyslu a je základem jeho vývoje a růstu.

Metamodelování a modelová transformace jsou klíčové koncepty ve vývoji strukturovaných a udržitelných systémů. Model je abstraktní reprezentací systému definovaného modelovým „jazykem“, kde modelový jazyk je vyjádření částí a procesů systému formální a přesně vyjádřenou cestou pomocí diagramů, pravidel, symbolů, značek, proměnných, čísel atd. Metamodel je definicí modelového jazyka a kvalitní metamodel popisuje modely dobře definovaným způsobem, lze jej chápat jako model modelu.

Ve druhé části se práce zaměřuje na teoretický popis řešeného problému, tedy proudění oleje mazací mezerou hydrodynamického ložiska automobilového turbodmychadla. Tato část se nejprve věnuje popisu turbodmychadla a jeho stavby, dále detailnímu rozboru ložiskové soustavy a možností mazání se zaměřením na hydrodynamické ložisko. Následuje popis proudění samotného maziva v axiálním ložisku.

Praktická část nejprve popisuje vznik a metodu výpočtového modelu proudění lubrikantu mazací mezerou. Výpočtový model je sestaven z Reynoldsovy rovnice, jsou určeny jeho okrajové podmínky a je proveden metodou nejmenších diferencí.

Následuje popis techniky metamodelování respozích ploch a kriging, jsou popsány použité optimalizační algoritmy, návrhový prostor a provedení na testovací funkci. Dále je použití metamodelu nad výpočtovým modelem, jeho výsledky a jejich zhodnocení.



## 1 OPTIMALIZACE

*„Optimalizace je akt, proces, nebo metodologie k vytvoření něčeho (jako je například konstrukce, systém, či rozhodnutí) jako zcela dokonalého, funkčního, nebo co možná nejúčinnějšího.“*

*[Merriam-Webster dictionary – volný překlad]*

Optimalizaci tedy můžeme popsat jako proces pro získání toho nejlepšího možného řešení problému při splnění všech zadaných podmínek. Obecný problém optimalizace lze popsat jako hledání globálního extrému funkce  $f(\mathbf{x})$ , kde  $\mathbf{x}$  je vektor návrhových proměnných. Obecný problém je většinou omezen vektory, vyjadřujícími podmínky rovnosti nebo nerovnosti [1]. Pokud problém neobsahuje omezení, problém je považován za neomezený [2]. Návrhové proměnné bývají omezeny horním a dolním limitem, označovaným vektory  $\mathbf{x}^{upper}$  a  $\mathbf{x}^{lower}$ , který definuje návrhový prostor. Návrhové proměnné mohou být kontinuální nebo diskrétní, což znamená, že mohou mít jakoukoli hodnotu, nebo pouze určité diskrétní hodnoty, mezi horní a dolní mezí. Návrhové body, které splňují všechna omezení, jsou proveditelné, zatímco všechny ostatní konstrukční body jsou neuskutečnitelné [1].

Inženýrské problémy, se kterými se lze v praxi setkat, mohou být svojí definicí velmi složité. Ve většině případů není možné vyjádřit optimalizovanou funkci analyticky. Toto platí dvojnásob u úloh s rozloženými parametry, které jsou popsány parciálními diferenciálními rovnicemi [3]. Proto je nutné použít pro nalezení globálního extrému vhodnou optimalizační metodu [4]. Optimalizační metodu je možné použít i tehdy, je-li známo analytické vyjádření funkce. To může být velmi složité a provedení parciálních derivací takřka nerealizovatelné [3]. Pak se nabízí použití optimalizační metody ve spojení s počítačem [5].

Z hlediska návrhového prostoru a znalostí o návrhu je lze rozdělit na metody pro globální optimalizaci a na metody pro optimalizaci lokální. Globální optimalizace je vhodná a nejčastěji využívaná při koncepčním a předběžném návrhu k vyhledání optimálního celkového uspořádání konfigurace [6]. Účelová funkce je postavena na základě komplexních charakteristik návrhu, jsou uvážena omezení vyhledávacího prostoru a cílem je nalezení optima nad celým tímto prostorem.



## 1.1 METAMODELOVÁ OPTIMALIZACE NÁVRHU

I přes neustálý vývoj v oblasti výpočetní techniky, komplexnost analýz, jako je metoda konečných prvků<sup>1</sup> nebo výpočet dynamiky tekutin<sup>2</sup>, je natolik vysoká, že tyto problémy nelze v praxi řešit opakovanými výpočty z důvodu jejich časové náročnosti [7]. Za poslední dvě desetiletí došlo k rozvoji aproximačních metod a aproximačně založených optimalizací, tento přístup zjednodušuje výpočetně intenzivní procesy za pomoci jednoduchých modelů [8]. Jednoduchý model lze v tomto případě nazvat jako metamodel a proces jeho sestavení jako metamodelování [9]. Za předpokladu použití metamodelu na optimalizační metody, lze tedy tyto metody využít k hledání globálního extrému v daném metamodelu, což se nazývá metamodelová optimalizace návrhu<sup>3</sup> [10].

Metamodel při optimalizaci návrhu může být dle literatury [11][8] využit pro:

- **Modelovou aproximaci.** Aproximace výpočtově náročných procesů napříč celým návrhovým prostorem nebo globální aproximace. Používá se ke snížení nákladů na výpočet.
- **Průzkum návrhového prostoru.** Prostor pro návrh je zkoumán, aby se zlepšilo pochopení konstrukčního problému pro inženýry tím, že pracuje na zjednodušeném metamodelu.
- **Formulace problému.** Na základě lepšího porozumění problému optimalizace návrhu může být zmenšen rozsah a snížen počet vyhledávání proměnných návrhu; mohou být odstraněna určitá neúčinná omezení; optimalizační problém s jedním cílem může být změněn na problém více objektivní a naopak.
- **Podpora optimalizace.** Průmysl má různé potřeby optimalizace, např. globální optimalizace, více objektivní optimalizace [12], multidisciplinární optimalizace designu, pravděpodobnostní optimalizace, a tak dále. Každý typ optimalizace má své vlastní výzvy. Metamodeling lze aplikovat a integrovat pro řešení různých typů optimalizačních problémů, které zahrnují výpočetně náročné funkce.

---

<sup>1</sup> V anglicky psané literatuře označováno jako „Finite Element Analysis - FEA“

<sup>2</sup> Přeloženo z anglického „Computational Fluid Dynamics - CFD“

<sup>3</sup> Přeloženo z anglického „Metamodel-Based Design Optimization – MBDO“



## 2 METAMODELOVÁNÍ

Metamodel je „model modelu“, např. aproximace detailního simulačního modelu [9]. Metamodelování je pojem zahrnující techniky a postup pro konstrukci takového modelu. Vyvinulo se z klasického konceptu návrhu experimentů<sup>4</sup>, v původním návrhu [13] jsou polynomicke funkce používány jako responzní plochy, nebo metamodely. Vedle dnes běžně používaných polynomickech funkcí bylo navrženo i použití stochastického modelu, které dostalo název Kriging (2.3). Pro aproximaci systému při generování povrchů odezvy se používají neuronové sítě<sup>5</sup>. Další typy modelů zahrnují radiální báze funkce<sup>6</sup> (2.4), multivariační adaptivní regresivní křivky<sup>7</sup> [14], polynomiální interpolace<sup>8</sup> [15] a strojové (induktivní) učení.

Neexistuje žádný způsob určení, který model je nejlepší, ale existuje mnoho studií uvádějících příklady jejich využití v daných situacích [16][17][18]. Kromě toho se často objevuje několik parametrů, které musí být nastaveny při sestavování metamodelu [19]. To znamená, že výsledky se mohou značně lišit v závislosti na tom, jak dobře jsou tyto parametry nastaveny, a proto výsledky také závisí na softwaru použitém k vytvoření metamodelu [20]. Namísto výběru pouze předpokládaného nejlepšího metamodelu lze kombinovat několik různých metamodelů. Představa je, že kombinovaný model by měl fungovat přinejmenším stejně jako nejlepší individuální metamodel, ale současně chránit před nejhoršími jednotlivými metamodely [21]. Pro kombinace metamodelů se nejčastěji používá jeden ze dvou modelů, vážený průměr náhrad<sup>9</sup>, ve kterém je modelu, který považujeme za přesnější, přiřazována větší váha, a naopak a aproximace více zdrojů<sup>10</sup> [19], ve které jsou metamodely překryty dalším (meta)metamodelem.

---

<sup>4</sup> Přeloženo z anglického „Design of Experiments – DOE“

<sup>5</sup> Přeloženo z anglického „Neural networks“

<sup>6</sup> Přeloženo z anglického „Radial Basis Functions – RBF“

<sup>7</sup> Přeloženo z anglického „Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS“

<sup>8</sup> Přeloženo z anglického „Least Interpolating Polynomials – LIP“

<sup>9</sup> Přeloženo z anglického „Weighted Average Surrogate – WAS“

<sup>10</sup> Přeloženo z anglického „Multi-Surrogate Approximation – MSA“



## 2.1 NÁVRH EXPERIMENTU (DoE)

Metamodeling zahrnuje výběr experimentálního návrhu pro generování dat, výběr modelu pro reprezentaci dat a následné přizpůsobení modelu pozorovaným datům<sup>11</sup> [22]. Pro každý z těchto kroků je několik možností. Výběr správné techniky metamodelování proto často probíhá právě skrze tyto tři kroky.

Tabulka 1 Techniky tvorby metamodelu [23]

VÝBĚR NÁVRHU	VÝBĚR MODELU	PŘIZPŮSOBENÍ MODELU	TECHNIKY MODELOVÁNÍ
(Frakční) Faktoriální			
Centrálně složený	Polynom (lineární, kvadratický)	Regrese nejmenších čtverců	→ <u>Responzní plochy</u>
Box-Behnken <sup>12</sup>	Spline (lineární, kubická)	Vážená regrese nejmenších čtverců	
D – Optimální	Realizace Stochastického procesu	Nejlepší nestranný lineární odhad	→ <u>Kriging</u>
G – Optimální	Vyhlazování jádra	Nejlepší lineární odhad	
Ortogonalní pole	Radiální bazová funkce	Log-Likelihood (Logaritmická pravděpodobnost)	
Plackett-Burman <sup>13</sup>			
Hexagon			
Hybridní	Síť neuronů	Zpětná propagace	→ <u>Neuronové sítě</u>
LHS (latin hypercube sampling) <sup>14</sup>	Databáze pravidel nebo rozhodovací strom	Entropie (teoretická)	→ <u>Strojové učení</u>
Ruční výběr			
Náhodný výběr			

<sup>11</sup> Přeloženo z anglického „Experimental design“, „Model choice“ a „Model fitting“

<sup>12</sup> Experimentální návrh [24]

<sup>13</sup> Experimentální návrh [25]

<sup>14</sup> Experimentální návrh [26]



## 2.2 TECHNIKY METAMODELOVÁNÍ

### 2.2.1 LINEÁRNÍ REGRESNÍ MODEL (RESPONZNÍ PLOCHY)

Lineární regrese je základní a běžně používaný typ prediktivní analýzy. Základní myšlenkou regrese je zkoumat, zdali soubor vstupních proměnných správně předpovídá výstupní (závislé) proměnné, které proměnné jsou zejména významnými prediktory výsledné proměnné a jakým způsobem ovlivňují výstupní proměnné [27].

Pokud bereme  $y$  za proměnnou, která dává odpověď, a  $x$  za vektor nezávislých faktorů ovlivňujících  $y$ , pak vztah mezi  $x$  a  $y$  je:

$$y = f(x) + \varepsilon \quad (1)$$

kde  $\varepsilon$  označuje náhodnou chybu normálního rozdělení se střední hodnotou nula a směrodatnou odchylkou  $\sigma$ . Jelikož skutečná funkce responzní plochy  $f(x)$  je obvykle neznámá, responzní plocha  $g(x)$  je vytvořena, aby aproximovala  $f(x)$ . Předpokládané hodnoty se poté získávají za použití:

$$\hat{y} = g(x) \quad (2)$$

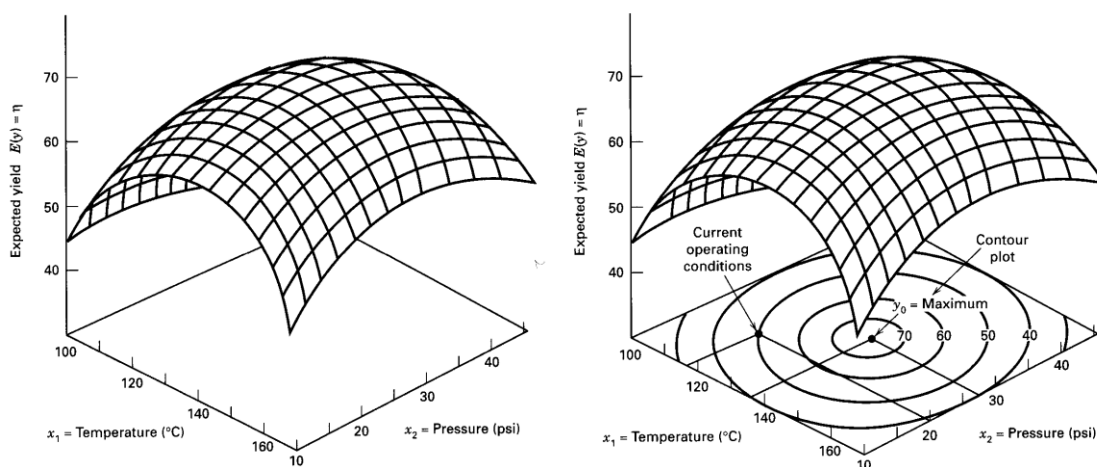
Nejpoužívanějšími funkcemi aproximace responzní plochy jsou polynomy nižšího řádu. Pro nízké zakřivení lze použít polynomy nízkého řádu, pro výrazné zakřivení polynomy vyššího (3+) řádu, které zahrnují veškeré dvou-faktorové interakce [28].

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i \quad (3)$$

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

Parametry polynomů nižšího řádu jsou obvykle vyjádřeny pomocí metody nejmenších čtverců tím, že se aproximace responzní plochy přizpůsobí na stávající data. Tyto aproximace se obvykle používají pro predikci v rámci metodiky odezvy povrchu<sup>15</sup> [22].

<sup>15</sup> Přeloženo z anglického „Response Surface Methodology – RSM“



Obr. 1 Responzní plocha zobrazující očekávaný výsledek ( $y$ ) jako funkci závislosti teploty ( $x_1$ ) a tlaku ( $x_2$ ) a obrysový (vrstevnicový) graf responzní plochy [29]





## 2.3 KRIGING

Kriging nebo také Gaussova procesní regrese [30] je metoda interpolace, pro kterou jsou interpolované hodnoty modelovány Gaussovým procesem řízeným předchozími kovariancemi<sup>16</sup>, vybranými tak, aby optimalizovaly hladkost<sup>17</sup> [31] naměřených hodnot [30]. Za vhodných předpokladů o předešlých hodnotách, dává kriging nejlepší lineární nestranný odhad<sup>18</sup> [32] předběžných hodnot. Interpolační metody založené na jiných kritériích jako je hladkost, nemusí poskytovat nejpravděpodobnější střední hodnoty. Metoda je široce používána v oblasti prostorové analýzy a počítačových experimentů.

Dle [33] existuje několik metod použití či verzí krigingu, mezi nejvíce používané patří obyčejný kriging<sup>19</sup>, jednoduchý kriging, univerzální kriging a co-kriging. Mezi méně používané metody krigingu potom patří indicator kriging, soft kriging, fixed rank kriging a další.

Myšlenkou krigingu je, že deterministická odezva  $y(x)$  [19] může být popsána za pomoci (5).

$$y(x) = f(x) + Z(x) \quad (5)$$

kde  $f(x)$  je známá polynomiální funkce proměnných  $x$  konstrukce a  $Z(x)$  je stochastický proces (náhodná funkce). Předpokládá se, že tento proces má nulovou odchylku (rozptyl)  $\sigma^2$  a nenulovou kovarianci. Pokud položíme  $f(x)$  jako konstantu, poté se jedná o obyčejný kriging [8]. Pokud je  $f(x)$  rovno nule, nazýváme metodu jednoduchý kriging [10].

---

<sup>16</sup> Vlastnost funkce zachování její formy, když jsou proměnné lineárně transformovány [35]

<sup>17</sup> Přeloženo z anglického „Smoothness“

<sup>18</sup> Přeloženo z anglického „Best linear unbiased prediction – BLUP“

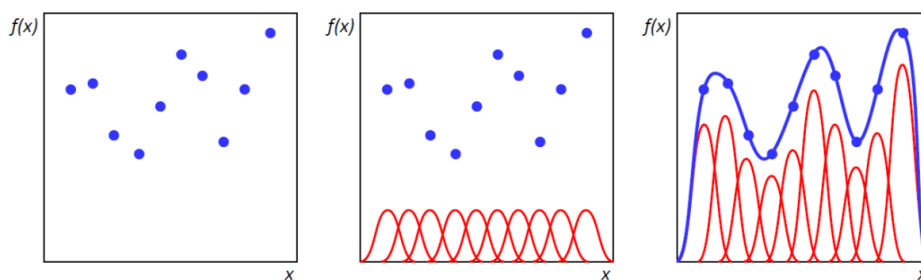
<sup>19</sup> Přeloženo z anglického „Ordinary Kriging“, „Simple Kriging“, „Universal Kriging“

## 2.4 RADIÁLNÍ BÁZOVÉ FUNKCE (RBF)

Radiální bázevé funkce jsou prostředky pro aproximaci vícerozměrných<sup>20</sup> funkcí lineárními kombinacemi výrazů založených na jediné jednorozměrné funkci (funkci radiální báze) [36]. Dle [37] metoda obvykle pracuje v  $n$ -dimenzionálním euklidovském prostoru, který nazýváme  $R^n$ . V tomto prostoru jsou body  $m$ , u kterých je funkce, která má být aproximována, známá, nazýváme je  $x_1, x_2, \dots, x_m$ . Tyto body jsou obvykle odlišné od sebe navzájem, v opačném případě se problém stane singulární při použití interpolace,  $n$  a  $m$  jsou kladná celá čísla. Funkce v bodech jsou potom označeny jako  $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_m)$ , které pocházejí z funkce  $f: R^n \rightarrow R$ , která je vyhodnocována v příslušných bodech. Tato funkce může být neznámá ve všech místech kromě bodů  $m$ . Hledanou aproximaci [37] lze poté vyjádřit jako (6).

$$Y(x) = \sum_{i=1}^N \omega_i \varphi(\|x - x_i\|) \quad x \in R^n \quad (6)$$

Kde:  $Y(x)$  - hledaná aproximace  
 $\omega_i$  - skalární parametry  
 $\varphi$  - radiální bázevé funkce  
 $x_i$  - body, ve kterých známe  $f(x)$   
 $x$  - volná proměnná, na které hledáme aproximaci



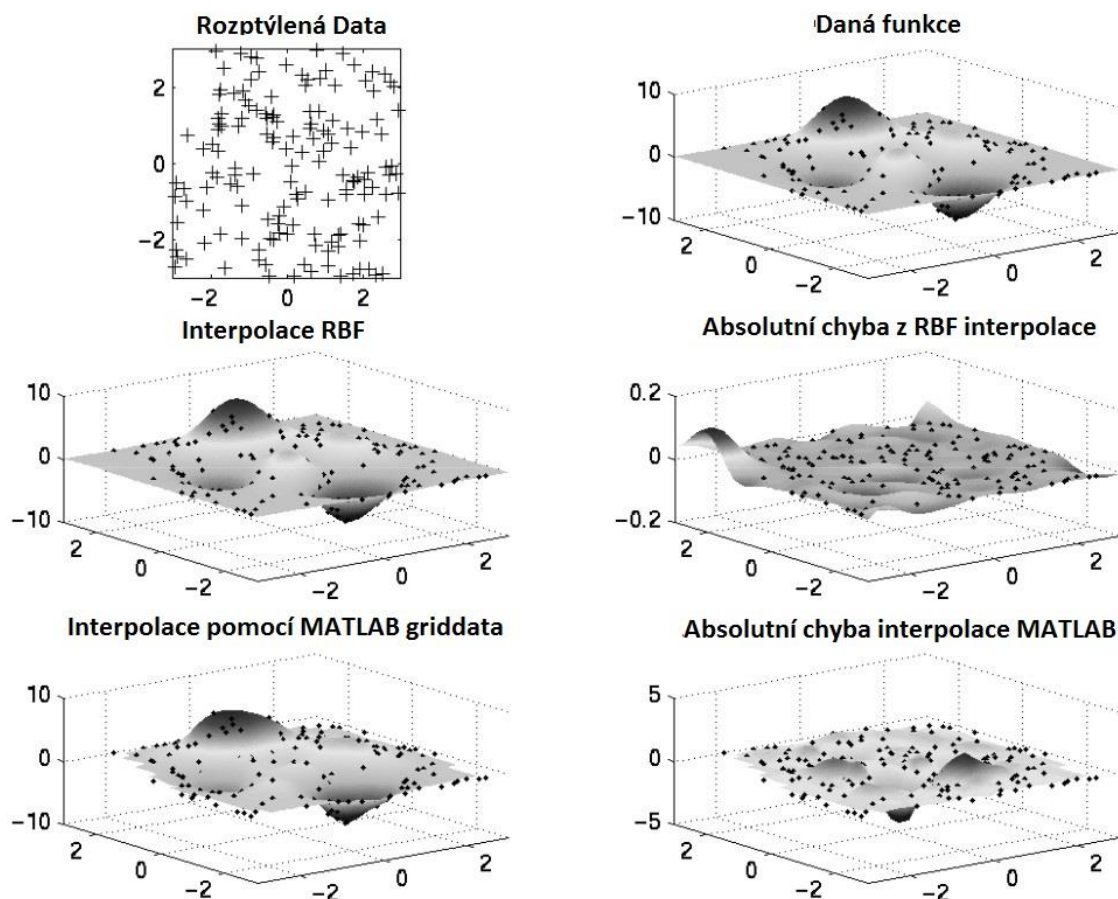
Obr.2 Princip aproximace radiální bázevou funkcí [38]

Může být použito několik typů RBF, nejpoužívanější jsou multikvadratická<sup>21</sup> a Gausova [36][40]. Funkci aproximace lze také interpretovat jako jednoduchý jednovrstvý typ umělé neuronové sítě nazývané radiální základnová síť [36]. Radiální bázevé funkce přebírají roli aktivačních funkcí sítě.

<sup>20</sup> Přeloženo z anglického „Multivariable“

<sup>21</sup> Přeloženo z anglického „Multiquadric“

Jakákoliv spojitá funkce v kompaktním intervalu může být v zásadě interpolována s libovolnou přesností součtem této formy, pokud se použije dostatečně velký počet radiálních základních nebo bázových funkcí  $N$ .



Obr.3 Interpolace pomocí radiální bázové funkce [39], upraveno

## 2.5 NEURONOVÉ SÍŤ

Neuronová síť<sup>22</sup> je jeden z výpočetních modelů používaných v umělé inteligenci [41]. Jejím vzorem je chování odpovídajících biologických struktur. Umělá neuronová síť je struktura určená pro distribuované paralelní zpracování dat. Skládá se z umělých (nebo také formálních) neuronů, jejichž předobrazem je biologický neuron. Neurony jsou vzájemně propojeny a navzájem si předávají signály a transformují je pomocí určitých přenosových funkcí. Neuron má libovolný počet vstupů, ale pouze jeden výstup.

<sup>22</sup> Umělá neuronová síť – Přeloženo z anglického „Artificial Neural Network -ANN“

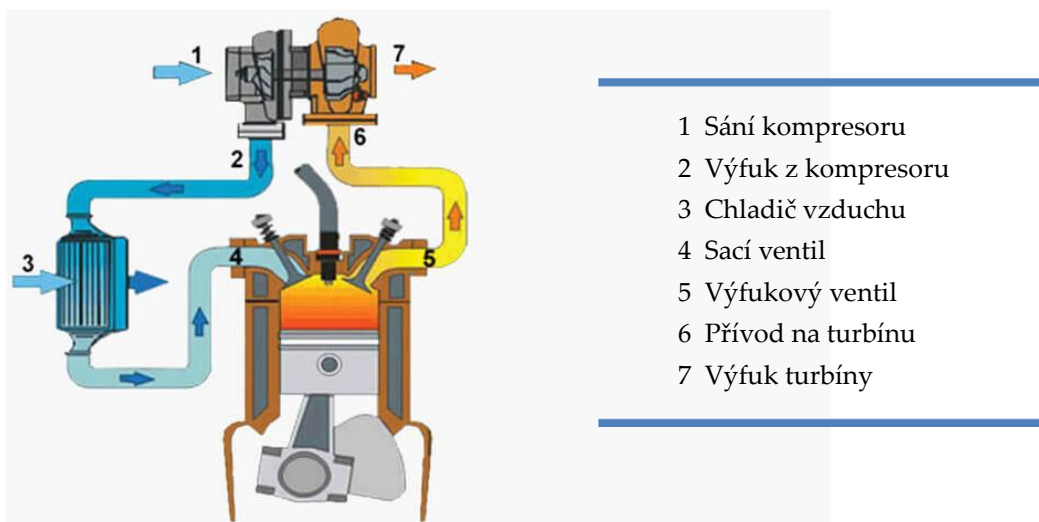


### 3 TURBODMYCHADLO

Po spálení paliva ve válci motoru zůstává ve výfukových plynech stále vysoké množství energie ve formě entalpie, jelikož je jejich teplota stále vysoká. U vznětových motorů dosahuje hodnot 820–850 °C a u motorů zážehových 950–1050 °C [42]. Bez přeplňování by tato energie unikla bez využití do okolí. Z toho důvodu se používají turbodmychadla.

#### 3.1 POPIS TURBODMYCHADLA

Turbodmychadlo, zjednodušeně “turbo”, je vysoce přesné vzduchové čerpadlo [43], které slouží k dodávání většího množství vzduchu do motoru tím, že využívá jako vlastní pohon odpadní energii motoru (výfukové plyny).



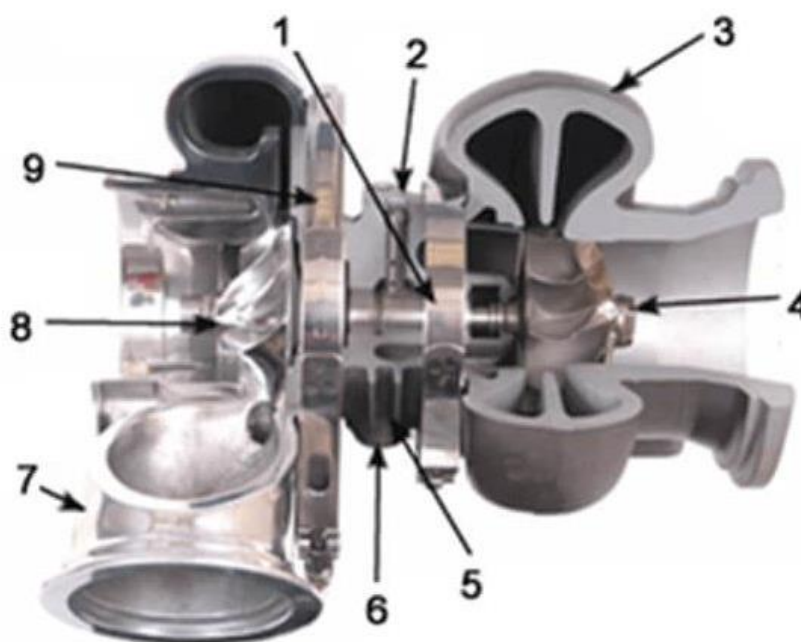
Obr.4 Schéma přeplňování motoru [44], upraveno

Výkon motoru je v základu úměrný množství vzduchu a paliva, které se mohou dostat do válců. Větší motory využívají více vzduchu a proto produkují větší výkon, pokud chceme, aby malý motor získal výkon velkého, je naším cílem přivést více vzduchu do válce, nejefektivnější způsob je právě využití turbodmychadla [45].

### 3.1.1 STAVBA TURBODMYCHADLA

Principem turbodmychadla je převedení tlaku spalin vycházejících z výfuku motoru na rotační pohyb turbíny, tento pohyb následně, přenesením krouticího momentu přes hřídel, roztáčí kompresor, který vhání větší množství vzduchu do válce a způsobuje přeplňování motoru.

Turbodmychadlo se tedy skládá ze tří hlavních částí, turbíny, hřídele a kompresoru [45]. Průřez turbodmychadlem je zobrazen níže (Obr. 5).



Obr.5 Průřez turbodmychadlem [44]

1. – Ložiskový systém	(Bearing system)	5. – Ložisková skříň	(Central housing)
2. – Vstup oleje	(Oil inlet)	6. – Výstup oleje	(Oil outlet)
3. – Turbínová skříň	(Turbine housing)	7. – Kompresorová skříň	(Compressor housing)
4. – Turbínové kolečko	(Turbine wheel)	8. – Kompresorové kolečko	(Compressor wheel)
9. – Backplate			

Spaliny jsou vedeny z výfuku do prostoru turbíny (3.), housing<sup>23</sup> je svým tvarem uzpůsoben, aby přiváděl spaliny na turbínové kolečko (4.), které mění pohybovou (kinetickou) energii výfukových plynů na energii (krouticí moment) hřídele pro pohon kompresoru. Kompresorové kolečko (8.) využívá krouticí moment hřídele

<sup>23</sup> Turbínová (kompresorová) skříň v anglické literatuře „Turbine (compressor) housing“



k natlakování vzduchu do motoru za pomoci skříně kompresoru (7.), která sbírá stlačený vzduch a směřuje jej do spalovací komory. Kompresorová a turbínová skříně jsou spojeny ložiskovou skříní (5.), ve které je umístěn ložiskový systém (1.). Ložiskové systémy mohou být různého druhu [73], nejpoužívanější je kombinace skládající se z axiálního<sup>24</sup> a radiálního<sup>25</sup> ložiska, radiální ložiska mohou být kluzná nebo kuličková. Mazání a chlazení turbodmychadla zajišťuje neustálá cirkulace oleje od vstupu do výstupu (z 2. do 6.) [46].

### 3.1.2 REGULACE TURBODMYCHADLA

S rostoucím objemem výfukových plynů při zvýšení otáček motoru se zároveň rychleji otáčí i rotor turbodmychadla. Zvýšení rychlosti je doprovázeno zvýšením mechanického a tepelného zatížení součástí. Objem je tedy třeba regulovat, aby nemohlo dojít k přetížení a poškození turbodmychadla. Nejčastějšími způsoby regulace je použití Wastegate (obtokový ventil), variabilní geometrie nebo použití dvou turbodmychadel<sup>26</sup> [47].

#### WASTEGATE NEBO OBTOKOVÝ VENTIL

Nejjednodušší a nejpoužívanější regulační metodou turbodmychadla je varianta s obtokovým ventilem neboli wastegate [47]. Od určitého tlaku vzduchu z motoru se wastegate otevírá na straně turbíny a vede proudění výfukových plynů kolem turbíny a přímo do výfukového systému. Rychlost turbíny se dále nezvyšuje. Neexistuje žádná jiná možnost regulace. Turbodmychadlo prakticky funguje pouze v rámci určitého rychlostního intervalu. Pokud jsou otáčky motoru a tím i průtok výfukových plynů příliš nízké, turbodmychadlo nevytváří žádný další výkon<sup>27</sup> [48]. Otevření ventilu zajišťuje pneumatický nebo elektrický aktuátor [49] (Obr. 6).

---

<sup>24</sup> Přeloženo z anglického „Thrust bearing“

<sup>25</sup> Přeloženo z anglického „Journal bearing“

<sup>26</sup> Biturbo, Register turbocharging, Dual Stage

<sup>27</sup> V anglické literatuře označováno jako „Turbo lag“

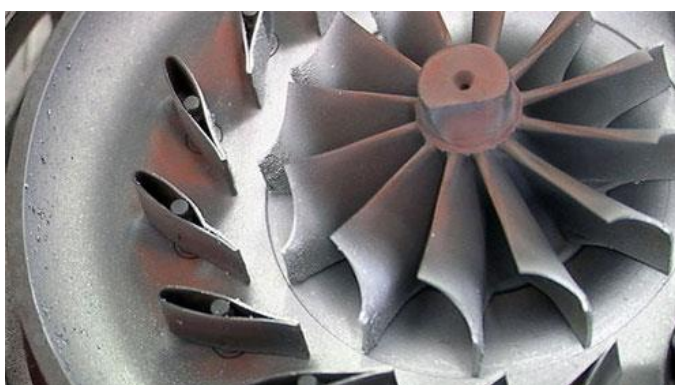




*Obr.6 Turbínová skříň s wastegate a pneumatickým aktuátorem.[50]*

### VARIABILNÍ GEOMETRIE

Variabilní geometrie<sup>28</sup> se využívá pro přesnější regulaci průtoku vzduchu. Turbodmychadla s VTG využívají natáčející-se vstupní lopatky na turbíně, aby byl optimalizován průtok spalin a účinnost turbodmychadla pro dosažení optimální spotřeby a přenosu výkonu. Při nízkých otáčkách jsou lopatky zavřené, spaliny tedy proudí pouze přes turbínu, což zvyšuje její výkon. Při vyšších rychlostech se lopatky pomalu otevírají, což umožňuje spalinám procházet celým prostorem turbínové skříňe, zajišťují tedy maximální možný průchod vzduchu přes turbínu a zároveň zabraňují přetížení [51].



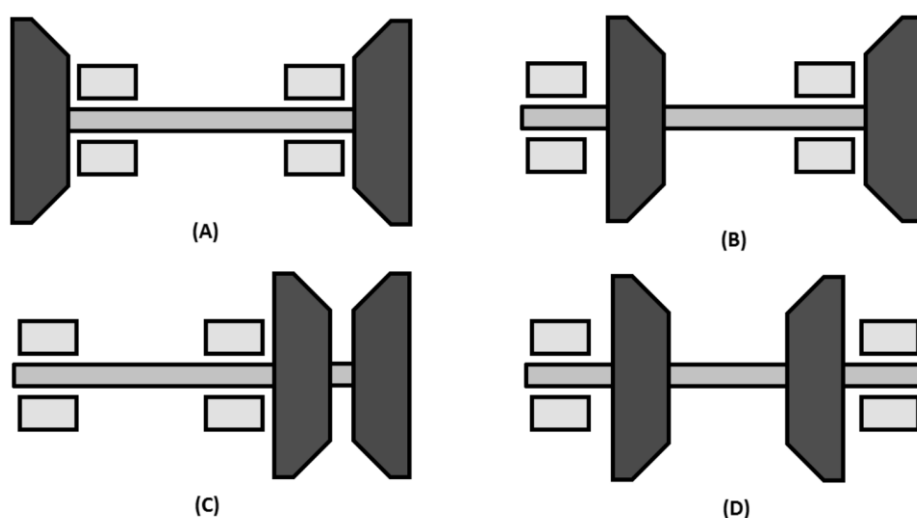
*Obr.7 Variabilní geometrie [52]*

---

<sup>28</sup> Přeloženo z anglického „Variable Turbine Geometry – VTG“

### 3.2 LOŽISKOVÁ SOUSTAVA TURBODMYCHADLA

Ložiskový systém turbodmychadla může být uspořádán několika způsoby. Nejběžnější konfigurace, používaná v současných malých turbodmychadlech a také v mnoha větších turbodmychadlech, je s ložisky umístěnými mezi koly (Obr. 10 - konfigurace A) [53]. Přívod oleje do ložisek se nachází mezi kompresorem a turbínovým kolem, což umožňuje poměrně jednoduché oddělení mazacího oleje od dráhy plynu.



Obr. 8 Možné konfigurace ložiskového systému turbodmychadla [54]

#### 3.2.1 RADIÁLNÍ LOŽISKA

Dnešní turbodmychadla nejvíce používají kluzná (fluidní) ložiska nebo kuličková ložiska [55]. Turbodmychadla s kluznými ložisky jsou cenově dostupnější než jejich protějšek s kuličkovými ložisky a jsou určeny pro většinu techniky, kde není kladen důraz na vysoký výkon, mají vysokou únosnost, dlouhou životnost, technickou jednoduchost a snadnou vyrobiteľnost. Použitím kluzných ložisek dochází k minimalizaci ztrát třením a vzhledem k tlumicímu efektu olejového filmu je možné rotor turbodmychadel provozovat přes několik stupňů kritických otáček [56]. Dražší varianta kuličkových ložisek nabízí snížené ztráty při provozu. Ložiska jsou vyrobená z bronzových, nebo hliníkových slitin [57].





### 3.2.2 AXIÁLNÍ LOŽISKA

Používají se pro zachycování axiálních sil rotoru. Tyto ložiska jsou plochá nebo kruhová. Ploché ložisko má nejčastěji úhel  $270^\circ$ . Kruhová ložiska mají úhel  $360^\circ$  a zvládnou větší axiální zatížení [58].



*Obr. 9  $270^\circ$  a  $360^\circ$  axiální ložisko [80][59]*

Otvorem ve středu ložiska prochází hřídel. Kolem otvoru jsou umístěny plošky, které způsobují vztlak oleje (4.2.2). Protože ložiska pracují na obě strany (jsou dvojité), jsou plošky umístěny i na druhé straně. Kanálky mezi ploškami slouží pro vedení oleje. Axiální ložiska se používají v kombinaci s přítlačnými manžetami, které náležejí hřídeli a působí jako jeho kluzné plochy směrem k ploškám [60].

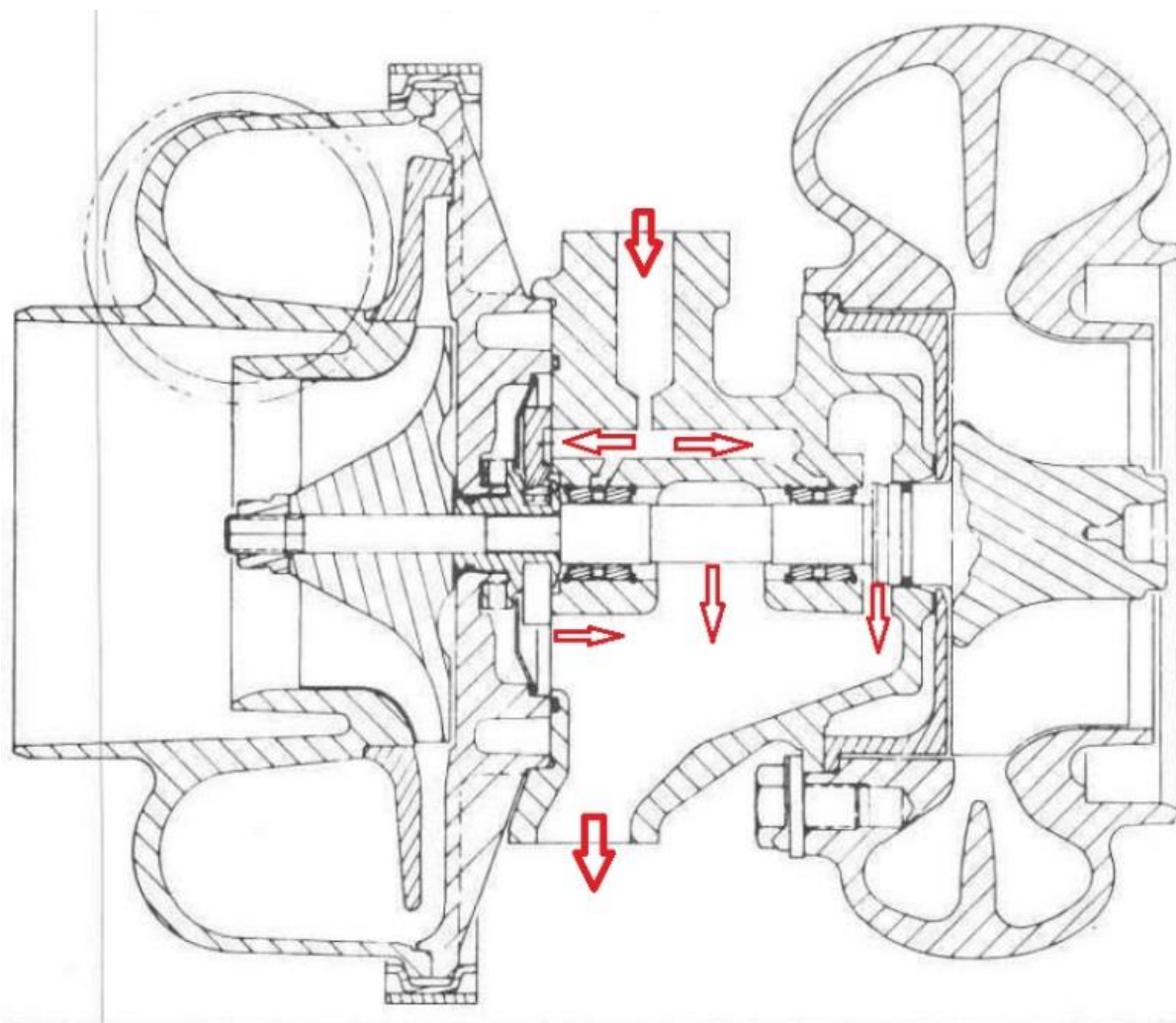
#### AXIÁLNÍ ZATÍŽENÍ

Zatížení rotoru v axiálním směru je způsobeno silou, která vzniká na turbínové i kompresorové straně turbodmychadla od působení vnějšího přetlaku, jak od proudícího vzduchu, tak i spalin. Zachycování axiálních sil způsobí nárůst teploty oleje v prostoru axiálního ložiska, který se cirkulací musí ochlazovat.

### 3.3 MAZACÍ SOUSTAVA TURBODMYCHADLA

Mazací soustava turbodmychadla je přímo napojena na mazací soustavu motoru, pro mazání se tedy používá motorový olej. Přívod oleje do turbodmychadla je znázorněn níže (Obr. 10). Olej je rovnoměrně rozveden na axiální a radiální ložiska a protéká skrze ně. Pro radiální ložisko olej vytváří kluzné vrstvy mezi hřídelí a ložiskem a mezi ložiskem a ložiskovou skříní. Vrstva oleje mezi radiálním ložiskem a skříní tlumí vibrace od turbínového kola, které by mohli způsobit kontakt ložiska s hřídelí [62]. Radiální ložisko se otáčí přibližně třikrát pomaleji než hřídel [61].

Pro axiální ložisko vstupuje olej na obě strany, které jsou opatřeny ploškami s náběžnou hranou<sup>29</sup>, ty směřují olej tak, aby vytvářel kluznou vrstvu mezi ložiskem a opěrným límcem<sup>30</sup> [62].



Obr.10 Mazací systém turbodmychadla [63], upraveno.

<sup>29</sup> V anglické literatuře uvedeno jako „trust pad“ nebo „oil ramp“

<sup>30</sup> Přeloženo z anglického „Thrust collar“



Olej vstupuje do mazací soustavy pod tlakem 0,3 – 0,5 MPa, při průchodu ložisky se míchá se vzduchem a vystupuje jako směs s atmosférickým tlakem. Ta s pomocí gravitace odtéká skrze výstup, hadicí, do klikové skříně motoru [62].

Těsnění ložiskové skříně je zajištěno pomocí pístních kroužků [64] na obou stranách hřídele. Na turbínové straně musí těsnění udržet kromě tlaku také vysokou teplotu, tlak je tu však vždy pouze v jednu směru, od turbíny. Pístní kroužky sedí těsně mezi stěnami drážky a zabraňují tak vniknutí výfukových plynů do ložiskové skříně, která má při funkci turbodmychadla vždy menší tlak než turbínová. Některá turbodmychadla používají také labyrintové těsnění [62].

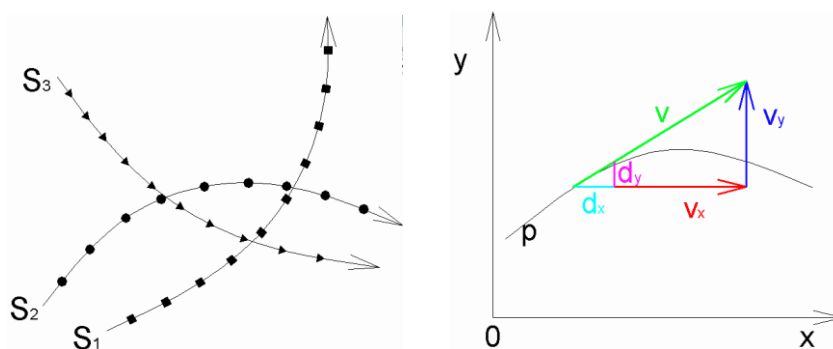
Těsnění na kompresorové straně je složitější kvůli střídání rozdílu tlaku mezi oběma skříněmi a musí zabránit nasátí oleje při vzniku podtlaku za kompresorovým kolečkem. Dieselové motory využívají pístních kroužků ve spojení s odstředivým “odčerpáváním”. U benzinových motorů se využívá navíc těsnění s O-kroužkem [62].

## 4 PROUDĚNÍ TEKUTIN - HYDRODYNAMIKA

Proudění je pohyb tekutin, kterým se zabývá hydrodynamika. V základu sleduje pohyb zkoumaného elementu „částice“ kapaliny jako hmotného bodu v prostoru, rovině nebo po křivce nebo celého proudu v určitém čase. Pro výpočet se poté zavádí zjednodušení na ideální (nevazké) kapaliny [65]. Proudění ideální kapaliny je popsáno dráhou a proudnicí (proudovou trubicí) částice.

Dráha (trajektorie) je křivkou, kterou probíhá částice tekutiny. Za ustáleného proudění se dráhy částic s časem nemění, pro neustálené proudění mohou být v každém časovém okamžiku jiné.

Proudnice jsou obálkou vektorů rychlostí a jejich tečny udávají směr vektoru rychlosti. Za ustáleného proudění se nemění rychlosti s časem, a proto mají proudnice stále stejný tvar a jsou totožné s drahami částic [66]. Pro neustálené proudění vytvářejí proudnice částice umístěné různě, rozdílné od částic dráhy. Svazek proudnic procházející uzavřenou křivkou je nazýván proudová trubice.



Obr.11 Dráha částice a Proudnice částice [65]

Proudění tekutin lze rozdělit dle fyzikálních vlastností, pro ideální kapaliny dělíme proudění na potenciální a vířivé.



#### 4.1 PROUDĚNÍ REÁLNÝCH KAPALIN

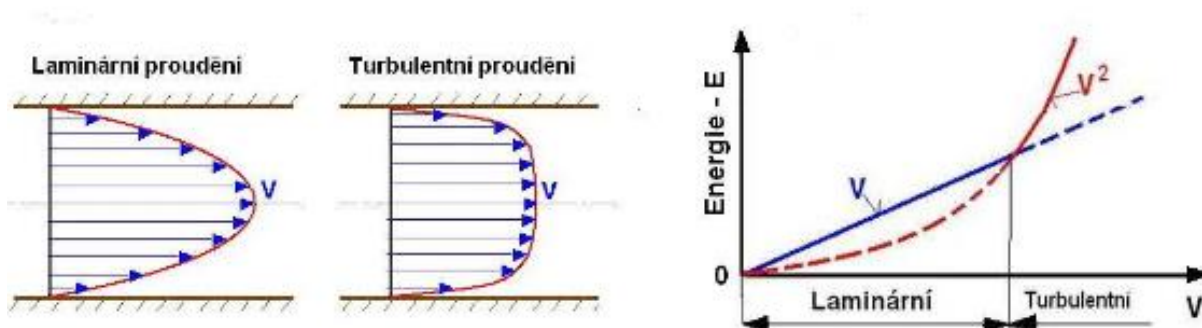
Proudění reálných kapalin popisuje aplikovaná hydrodynamika neboli hydraulika a je ovlivněno množstvím faktorů [65]. Proudění skutečné (vazké) tekutiny se dělí na laminární a turbulentní. Existenci obou proudění dokazuje Reynoldsův pokus [67].

Pro laminární proudění se částice tekutiny pohybují v tenkých vrstvách, aniž by se přemísťovaly po průřezu. Pro turbulentní proudění působí také turbulentní (flukтуаční) rychlost, která přemísťuje částice po průřezu [65].



Obr.12 Laminární a turbulentní proudění [66]

Hydraulický odpor laminárního proudění je lineárně závislý na rychlosti, pro turbulentní proudění je závislý na druhé mocnině rychlosti.



Obr.13 Rychlostní profil v potrubí a hydraulický odpor [66]

Přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním je určen Reynoldsovým kritickým číslem, které je definováno jako:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (7)$$

- $v$  – střední rychlost tekutiny
- $d$  – charakteristický rozměr (průměr potrubí)
- $\nu$  – kinematická viskozita tekutiny

Pro proudění v kruhovém potrubí je kritické Reynoldsovo číslo  $Re_{krit} = 2320$  [67].



#### 4.1.1 ROVNICE PROUDĚNÍ SKUTEČNÉ KAPALINY

##### ROVNICE KONTINUITY

Rovnice kontinuity je shodná pro ideální i skutečnou tekutinu, řídí se zákonem zachování hmotnostního průtoku (hmotnosti), platí tedy, že součet konvektivní a časové změny průtoku je roven nule. Obecná rovnice kontinuity pro neustálené prostorové proudění stlačitelné tekutiny[65]:

$$\iiint_V \frac{\delta(\rho)}{\delta t} dV + \iint_S \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (8)$$

- $S$  – plocha průřezu [ $\text{m}^2$ ]
- $V$  – objem [ $\text{m}^3$ ]
- $\vec{v}$  – vektor rychlosti proudění kapaliny [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $\rho$  – hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $t$  – čas [ $\text{s}$ ]

V diferenciálním tvaru:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta(\rho v_x)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho v_y)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho v_z)}{\delta z} = 0 \quad (9)$$



### NAVIEROVA-STOKESOVA ROVNICE PRO NESTLAČITELNOU KAPALINU

Setrvačná síla  $F_s$  je rovna součtu hmotnostní síly  $F_o$  [N], tlakové síly  $F_p$  [N] a třecí síly  $F_t$  [N]:

$$\vec{F}_s = \vec{F}_o + \vec{F}_p + \vec{F}_t \quad (10)$$

Třecí síly jsou způsobeny viskozitou tekutiny, ta je vyjádřena Newtonovým vztahem. Po stanovení rovnováhy všech sil působících na elementární objem tím, že Eulerovu rovnici rozšíříme o derivace změny normálových a tečných napětí podle souřadnic, dostaneme Navierovu-Stokesovu rovnici pro nestlačitelnou kapalinu v pravoúhlém souřadném systému[65]:

$$\frac{\delta \vec{v}}{\delta t} + (\vec{v} \cdot \text{grad})\vec{v} = \vec{a} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \Delta \vec{v} \quad (11)$$

- $\Delta$  – Laplaceův operátor pro tři souřadnice [65]
- $\frac{\delta \vec{v}}{\delta t}$  – lokální derivace nezávislá na přemísťování tekutiny
- $(\vec{v} \cdot \text{grad})\vec{v}$  – konvektivní člen
- $a$  – vnější zrychlení

### BERNOULLIHO ROVNICE PRO SKUTEČNOU TEKUTINU

Rovnováha sil při proudění skutečných kapalin je vyjádřena Navierovou-Stokesovou rovnicí (11). Rovnice energie vzniká za předpokladu, že je vnější zrychlení:

$$a = \text{grad } U \quad (12)$$

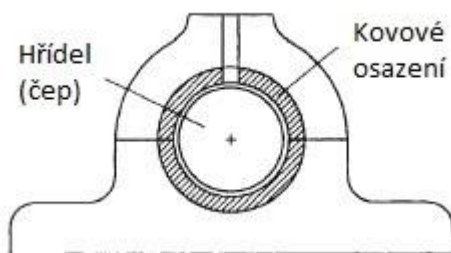
Rovnici vynásobíme skalárně vektorem dráhy  $ds$ . Rovnice energie [66] má tvar:

$$\frac{\delta v}{\delta t} ds + (\vec{v} \cdot \text{grad})v \cdot ds = a \cdot ds - \frac{1}{\rho} \text{grad} p \cdot ds + \nu \Delta v \cdot ds \quad (13)$$



#### 4.1.2 HYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ

Hydrodynamické mazání je pojem popisující ideální stav mazání, kde nedochází ke tření a opotřebení povrchů. Typickým příkladem hydrodynamického mazání je radiální ložisko.



Obr.14 Hydrodynamické mazání radiálního ložiska [68], upraveno

V případě radiálního ložiska (Obr. 14) je střed hřídele (čepu) vychýlen od středu ložiska směrem dolů kvůli zatížení ložiska, vůle mezi hřídelí a ložiskem se tedy po obvodu mění. V prostoru, kde se vůle zmenšuje ve směru otáčení hřídele, tvoří olejový film klín, ve kterém vzniká tlak v důsledku otáčení hřídele. Tento jev se nazývá Klínový efekt olejového filmu a byl poprvé popsán Reynoldsem [68]. Zatížení ložiska je neseno tlakem olejového filmu a hřídel se vznáší na olejovém filmu. Třecí odpor je proto velmi malý.





## 4.2 PROUDĚNÍ VISKÓZNÍCH TEKUTIN TENKÝMI MEZERAMI

Pro proudění viskózních tekutin tenkými mezerami se můžeme setkat se třemi základními stavy. V prvním případě se jedná o proudění mezi rotující součástí a plochou, které popsal Cole, Keller a Saffman [69]. Ve druhém případě se jedná o mazací vrstvu krátkého radiálního ložiska, kterou popsal Hori [68]. Třetím stavem je olejový film axiálního ložiska, který popsal Stachoviak a Batchelor [70].

### 4.2.1 PROUDĚNÍ MEZI ROTUJÍCÍ SOUČÁSTÍ A PLOCHOU

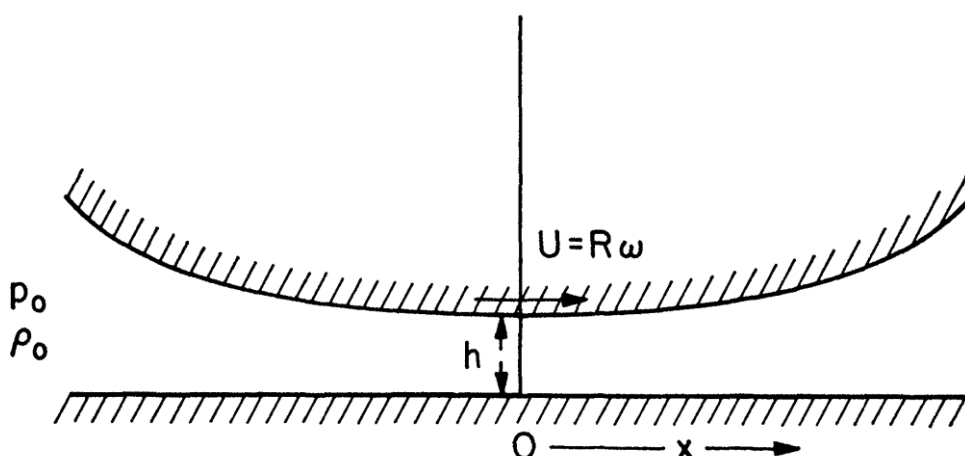
S obvyklými předpoklady teorie mazání a dalším předpokladem izotermického filmu, který splňuje Boyleův-Mariottův [71] zákon, Navier-Stokesova rovnice přináší rovnici pro tlak:

$$\frac{d}{d\phi} \left( \frac{p}{p_0} \right) = \beta \cos^2 \phi - \alpha \left( \frac{p_0}{p} \right) \cos^4 \phi \quad (14)$$

Kde  $\phi$ , nebo  $x$  je nezávislá proměnná definovaná jako:

$$x = (2Rh)^{1/2} \tan \phi \quad (15)$$

- $R$  - poloměr rotující části (viz. Obr. 15)
- $h$  - výška (viz. Obr. 15)
- $\omega$  - úhlová rychlost rotující části
- $U = R\omega$



Obr.15 Mezera mezi rotující součástí a plochou[69]

Potom jsou parametry  $\alpha$  a  $\beta$  definovány jako:



$$\alpha = \frac{12\mu F}{p_0 \rho_0} \left( \frac{2R}{h^5} \right)^{1/2}, \beta = \frac{6\mu U}{p_0} \left( \frac{2R}{h^3} \right)^{1/2} \quad (16)$$

- $\mu$  - koeficient viskozity
- $F$  - hmotnostní tok na jednotku v olejovém filmu
- $p_0$  – tlak
- $\rho_0$  – hustota

Za předpokladu tlaku (okrajových podmínek):

$$p(-\pi/2) = p(\pi/2) = p_0 \quad (17)$$

Svislý tah  $T$  na ložisku je přibližně:

$$T = \int (p - p_0) dx = p_0 (2Rh)^{1/2} \int_{-(\frac{1}{2})\pi}^{(\frac{1}{2})\pi} \left( \frac{p}{p_0} - 1 \right) \sec^2 \phi d\phi \quad (18)$$

Existuje také příspěvek z viskózních napětí, která jsou však menší faktorem řádu  $h/R$ .

Výše uvedená formulace je vhodná pro popis jiných konfigurací při použití malých úprav. Například, pokud je mazivo protlačováno mezerou tlakovým spádem, s tlakem na vstupu  $p_0$  ( $x < 0$ ) a tlakem na výstupu  $p_2 < p_0$  ( $x > 0$ ), stačí nám pouze upravit okrajové podmínky (17) :

$$p(-\pi/2) = p_0, p(\pi/2) = p_2 \quad (19)$$

Obecně, parametr  $\beta$  je daný a naším úkolem je zjistit  $p(\phi)$  a  $\alpha$  tak, aby byly splněny podmínky (14) a (17) nebo (14) a (19). Průběh za použití podmínek (14) a (17) je potom nazýván případem volného proudění<sup>31</sup> a druhý průběh popisuje případ nuceného proudění<sup>32</sup>.

<sup>31</sup> Přeloženo z anglického „Free flow“

<sup>32</sup> Přeloženo z anglického „Forced flow“



## VOLNÉ PROUDĚNÍ

Pro malé  $\beta$  je problém (14) s okrajovou podmínkou (17) pravidelný. Pro malé  $\beta$  je řešení vyjádřeno jako mocninová řada v  $\beta$ . Kvůli zvláštní okrajové podmínce v (17) je parametr  $\alpha$  volný a musí být také vyjádřen sériovým rozšířením v  $\beta$ . Rovnice druhého řádu jsou:

$$\frac{p(\phi)}{p_0} = 1 - \frac{\beta}{3} \sin \phi \cos^3 \phi + \frac{\beta^2}{18} \cos^8 \phi + O(\beta^3) \quad (20)$$

$$\alpha = \frac{4}{3} \beta + O(\beta^3) \quad (21)$$

$$\frac{T}{p_0 \sqrt{2Rh}} = \frac{5\pi}{288} \beta^2 + O(\beta^3) \quad (22)$$

Pro první pořadí v  $\beta$  je to známé nestlačitelné limitní řešení, které je liché kolem  $x = 0$  a nemá žádný tah. Korekce druhého řádu poskytuje nenulový tah, ale nemění hmotnostní tok  $\alpha$ .

Pro řešení  $\beta \gg 1$  po zavedení následujících podmínek dle [69]:

$$y\left(\frac{\pi}{2}\right) = y\left(-\frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (23)$$

$$y(0) = \frac{p_0}{p_1} \quad (24)$$

Získáváme tah na ložisku z (18):

$$\frac{T}{p_0 (2Rh)^{1/2}} = \frac{1}{y(0)} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [y(\theta) - y(0)] \csc^2 \theta \, d\theta \quad (25)$$



## NUCENÉ PROUDĚNÍ

V tomto případě musíme vyřešit (14) pro okrajové podmínky (19), kde  $p_2 < p_0$ . Pro  $\beta = 0$  v (14), kdy je nucené proudění aplikováno na mezeru se stacionární rotující částí (nerotující částí) vede integrace na:

$$\left(\frac{p(\theta)}{p_0}\right)^2 = 1 - \frac{\alpha}{2} \left[ \frac{3}{2} \left( \phi + \frac{\pi}{2} \right) + \sin 2\phi + \frac{\sin 4\phi}{8} \right] \quad (26)$$

Podmínka (20-22) je splněna, pokud  $\alpha$ , určující hmotnostní tok má hodnotu:

$$\alpha = \frac{16}{3\pi} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_0} \right)^2 \right] \quad (27)$$

Pomocí tohoto řešení je možno odvodit nucený průtok mřížkou nebo mřížovým stacionárních válců (nerotujících rotačních částí) způsobem popsaným Kellerem [32] pro nestlačitelnou tekutinu.

Řešení problému (26) v prvním řádu a vyšších řádech lze jednoduše zapsat, tyto rovnice však nejsou nijak informativní, protože integrace nelze vyjádřit z hlediska elementárních funkcí.

Řešení nuceného proudění není periodickou funkcí  $\phi$ , ale stále můžeme tento problém vyjádřit z hlediska proměnných  $\theta = \phi - \pi/2$  a  $y(\theta) = p/p_1$ . Hraniční podmínky (18) jednoduše vyžadují, aby  $y(\theta)$  bylo nespojité pro  $\theta = 0$  a splňovalo následující skokovou podmínku:

$$y(0-) = \frac{p_2}{p_0} y(0+) \quad (28)$$

Řešení musí splňovat diferenciální rovnici (22) v každém z intervalů  $\pi/2 > \theta > 0$  a  $0 > \theta > -\pi/2$ , musí zároveň splňovat hraniční hodnoty (24) a musí splňovat podmínky skoku (28)

Předchozí numerický postup je snadno modifikovatelný pro úpravu případu nuceného proudění. Systém prvního řádu (25) je integrován z  $\pi/2$  do  $\theta = 0+$  a podmínky skoku potom jsou:

$$u(0-) = \frac{p_2}{p_0} u(0+) \quad (29)$$

$$v(0-) = \frac{p_2}{p_0} v(0+) \quad (30)$$

Tyto podmínky jsou aplikovány a integrace od  $\theta = 0-$  do  $-\pi/2$  pokračuje. Zbytek výpočtu pro tah je nezměněn.

#### 4.2.2 MAZÁNÍ AXIÁLNÍHO LOŽISKA (THRUST BEARING)

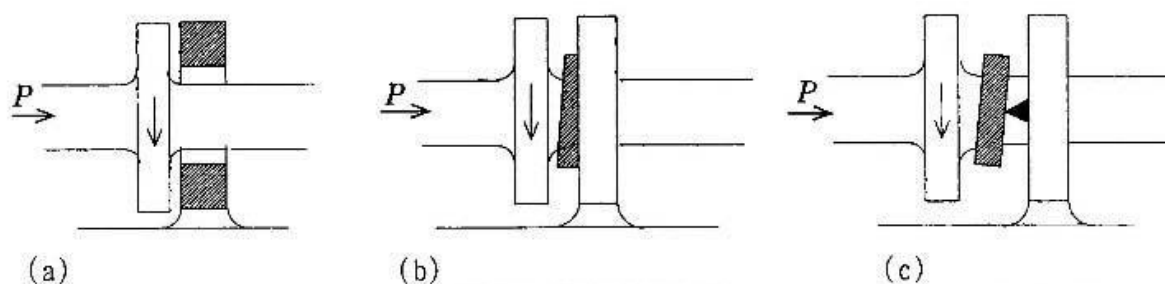
Axiální zatížení působící na hřídel se nazývá tah. Ložisko navržené tak, aby zvládalo vysoké axiální zatížení, tedy tah, se nazývá axiální ložisko. V praxi se používá anglického tvaru „Thrust bearing“.

##### TEORIE AXIÁLNÍHO LOŽISKA

V případě radiálního ložiska, kde se klín olejového filmu tvoří automaticky díky excentricitě kvůli zatížení ložiska, je zátěž generována samotným nákladem (vnější silou). V případě axiálního ložiska se však klín automaticky netvoří, a proto musí být vytvořen uměle.

Původní axiální ložiska se skládala z prvního, rotujícího disku upevněného na hřídeli a druhého, stacionárního disku (Obr.16 a). Protože byly disky paralelní, nebyl mezi nimi vytvořen klín olejového filmu, a proto byla nosnost teoreticky nulová. Mezi disky docházelo k pevnému tření a tím k silnému vzniku tepla a opotřebení.

Prvním pokusem o řešení tohoto problému bylo vytvořit umělý olejový film za pomoci pevné šikmé podložky (Obr.16 b). Přestože je tento pokus funkční, optimální úhel sklonu podložky je velmi malý a je obtížné dokončit šikmou plochu s dostatečnou přesností. Kromě toho, i když by mohl být úspěšně vyroben, může se sklon měnit v důsledku pružné deformace nebo tepelné deformace.



Obr.16 Vývoj axiálního ložiska [68]

K finálnímu řešení tohoto problému došli nezávisle na sobě Rakušan A. G. M. Michell a Američan A. Kingsbury [68]. Jejich řešením bylo podepřít šikmou desku v určitém bodě o něco málo za středem s pomocí otočného čepu, tak, že se může volně naklánět (Obr. 16 c). Vzhledem k tomu, že výkyvná deska (nebo vložka) má takovou vlastnost, že její sklon je automaticky určován polohou otáčení, může být automaticky vytvořen klín s optimálním sklonem olejového filmu volbou vhodné polohy otáčení. Tento přístup vyústil v první rozumnou konstrukci pro axiální ložisko.



Dnešní axiální ložiska používají pro vytvoření klínu olejového filmu „pad“, tedy zešíkmenou sektorovou plošku v dané vzdálenosti od středu, axiální ložisko používá čtyři až sedm takovýchto plošek (Obr. 16). Plošky jsou uspořádány po obvodu kruhu a směřují k rotujícímu disku. Bod na obrázku ukazuje polohu otáčení. Pro výpočet se používá Reynoldsova rovnice ve válcových souřadnicích.

Je zde uvažován stacionární tok nestlačitelné viskózní kapaliny. Rovnováha sil působících na malý objemový prvek ve válcových souřadnicích  $(r, \theta, z)$  je vyjádřena následovně:

$$\mu \frac{\delta^2 v_r}{\delta z^2} = \frac{\delta p}{\delta r} - \frac{\rho v_\theta^2}{r} \quad (31)$$

$$\mu \frac{\delta^2 v_\theta}{\delta z^2} = \frac{1}{r} \frac{\delta p}{\delta \theta}, \quad \frac{\delta p}{\delta z} = 0 \quad (32)$$

- $p$  – tlak
- $\mu$  - koeficient viskozity
- $v_r, v_\theta$  – rychlosti proudění v radiálním a obvodovém směru
- $\frac{\rho v_\theta^2}{r}$  – odstředivá síla

Po úpravě [73] získáváme finální Reynoldsovu rovnici:

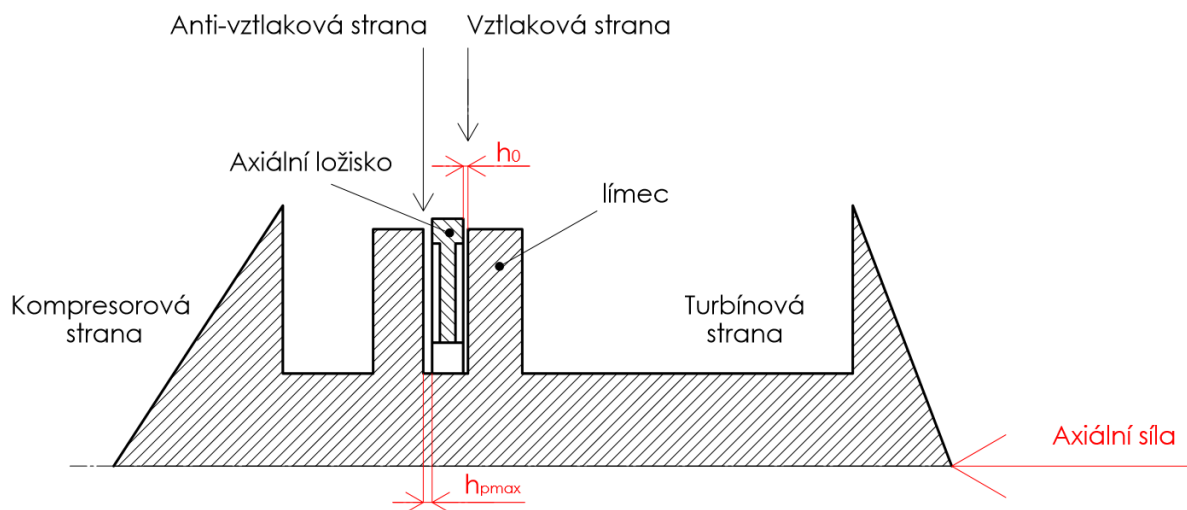
$$\frac{\delta}{\delta r} \left( r h^3 \frac{\delta p}{\delta r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta \theta} \left( h^3 \frac{\delta p}{\delta \theta} \right) = 6 \mu r \omega \frac{\delta h}{\delta \theta} \quad (33)$$

- $\omega$  – úhlová rychlost rotujícího disku
- $h$  – výška olejového filmu



## 5 VÝPOČTOVÝ MODEL

Základní výpočtový model proudění oleje v mazací vrstvě axiálního ložiska turbodmychadla byl sestaven na Reynoldsově rovnici (33). Následně byl převzat výpočtový model vytvořen v rámci fakultního projektu, tento model je proprietou FSI VUT a nemůže být zveřejněn. Následuje popis procesu výpočtového modelu.



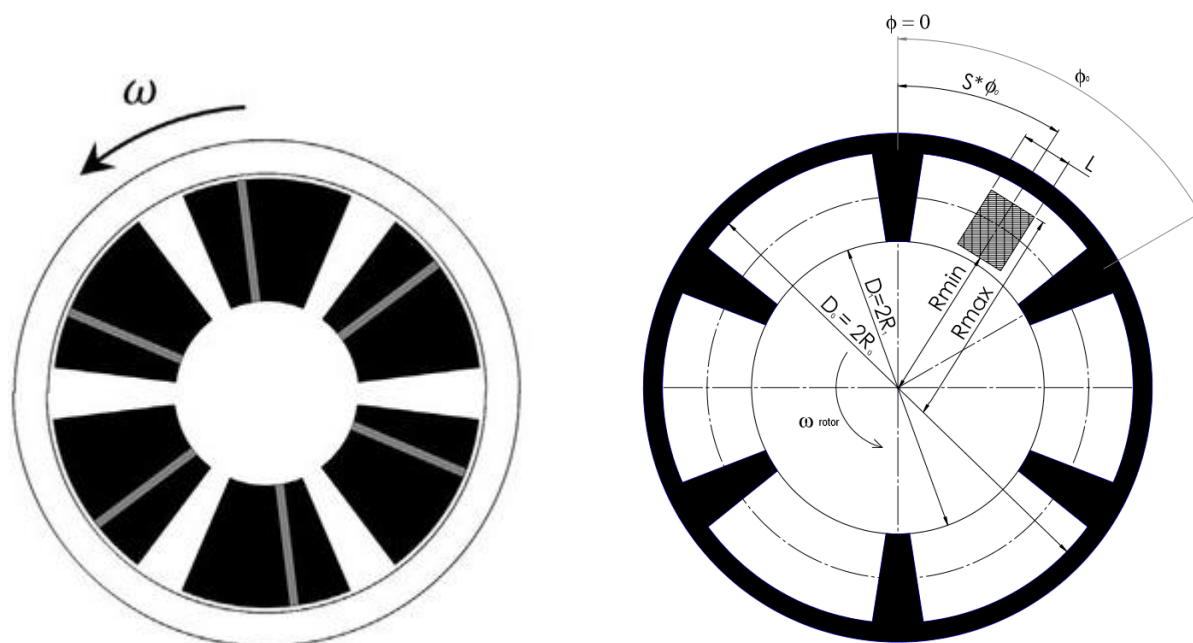
Obr. 17 Umístění a vyvážení axiálního ložiska [75], upraveno

Axiální ložisko je umístěno mezi dvěma stranami axiálního límce<sup>33</sup> a za pomoci vztlaku vyvažuje působení axiálního zatížení obou stran hřídele. Výpočtový model předpokládá vstupní axiální zatížení od turbínové strany a hledá pro toto zatížení odpovídající excentricitu ložiska.

<sup>33</sup> Přeloženo z anglického „Thrust collar“



Nejprve byla určena oblast našeho výpočtu, a to střed axiálního ložiska, ve kterém vzniká olejová vrstva, byly definovány hlavní rozměry a okrajové podmínky oblasti výpočtu (Obr. 18).

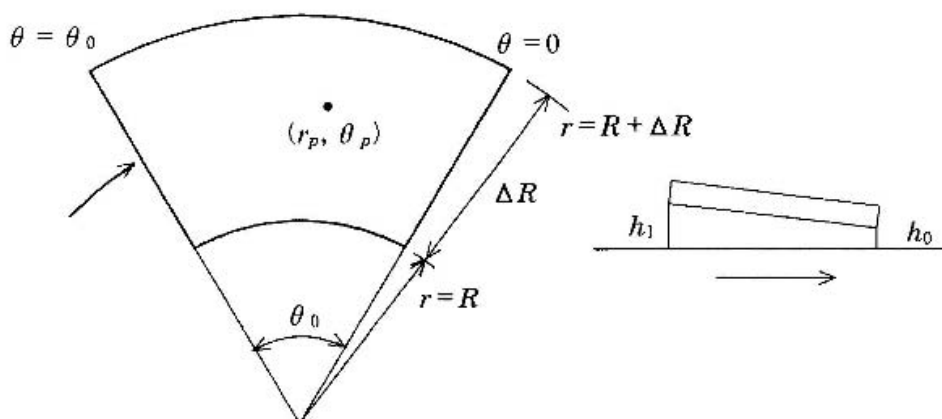


Obr. 18 Postavení "padů" na ložisku a hlavní rozměry jednoho padu [74][75]

$\omega$	-	úhlová rychlost
$D_1$	-	minimální průměr funkční plochy
$D_0$	-	maximální průměr funkční plochy
$R_{min}$	-	minimální poloměr
$R_{max}$	-	maximální poloměr
$S$	-	poměr úhlu polohy kanálku k celkovému úhlu
$\phi$	-	úhel počítané funkční plochy

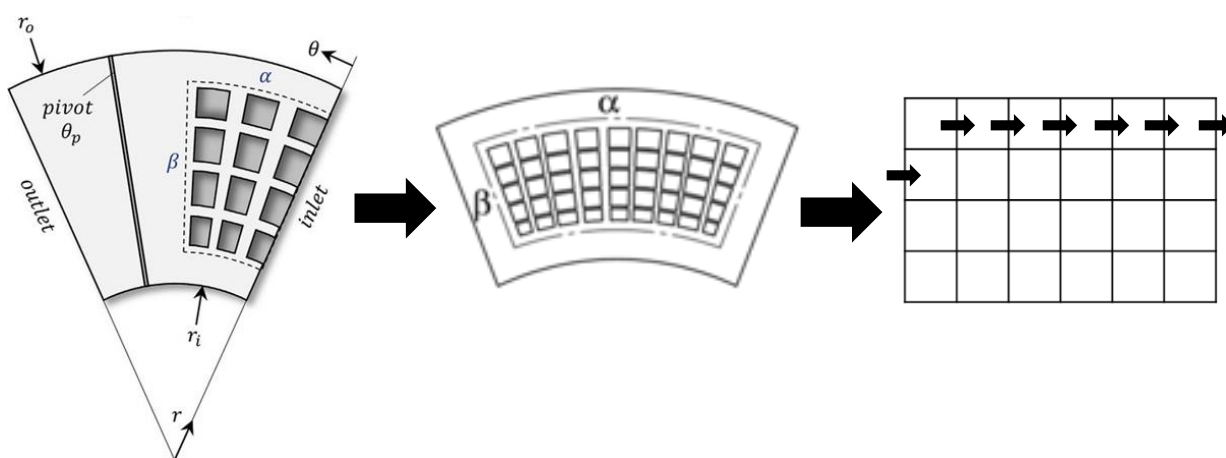
Oblast výpočtu byla dále omezena na jeden samotný pad, na něm byly definovány okrajové podmínky (Obr.18)





Obr.19 Definice okrajových podmínek na „padu“ [68]

Na samotném padu byla následně vytvořena síť bodů, omezená okrajovými podmínkami, ve kterých probíhá výpočet, pro zjednodušení byla síť převedena ze tvaru kruhové výseče na čtvercovou síť (Obr. 20). Následně proběhl výpočet metodou konečných diferencí [76].



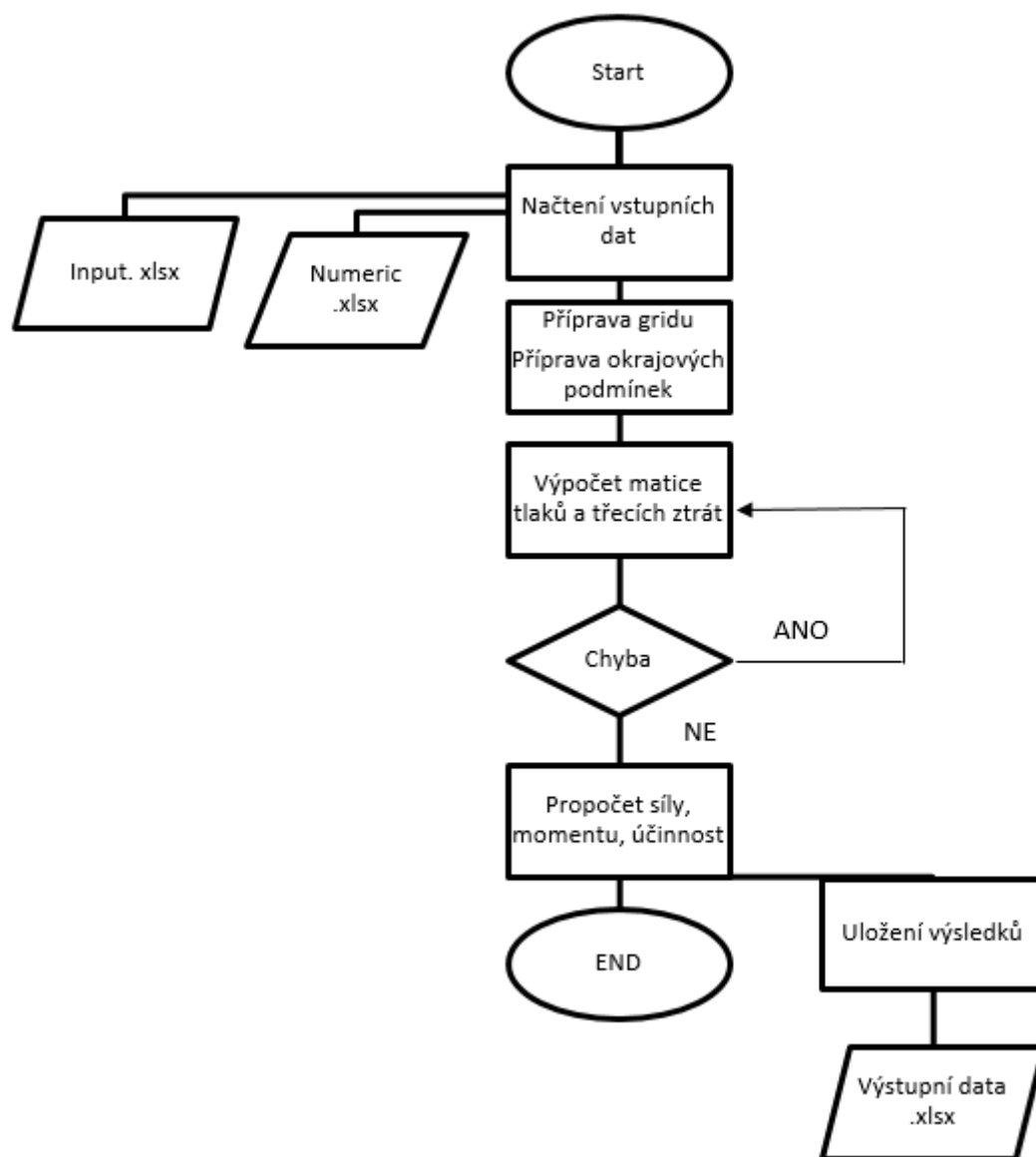
Obr. 20 Převedení bodů na "padu" na čtvercovou síť, postup výpočtu matice tlaků a třecích ztrát. [74][75]

Na řešené oblasti (čtvercová síť uzlových bodů) byla pro každý uzel vypočtena příslušná difference s použitím série předpočítaných parametrů. Výpočet postupoval po sloupcích a řadách sítě (Obr. 20 vpravo), dokud nebyla propočítána celá síť.

Celý výpočet probíhal tak dlouho, dokud nebyla splněna ukončující podmínka, kterou byla relativní změna vypočítané únosnosti ložiska ve dvou po sobě jdoucích iteracích.



Zjednodušený popis jednotlivých operací výpočtového modelu je zobrazen ve vývojovém diagramu (Obr. 21).



Obr. 21 Vývojový diagram výpočtového modelu [Vlastní zdroj]



## 6 METAMODEL

Metamodel výpočtového modelu byl sestaven v programovacím jazyce Python 3.4 za použití vývojového prostředí JetBrains PyCharm Community Edition 2018.3.5.

V tomto prostředí byla vytvořena série metamodelů s využitím technik metody responzních ploch (2.2.1) a kriging (2.3)

Návrhový prostor byl vymezen dvěma parametry, které jsou využity ve výpočtovém modelu proudění a blíže jsou popsány níže.

### 6.1 OPTIMALIZAČNÍ ALGORITMY

#### 6.1.1 RESPONZNÍ PLOCHY

Aproximace zkoumaného systému (závislost třetího momentu na dvou geometrických parametrech získaná pomocí výpočtového modelu) jsou zde provedeny pomocí polynomů vyšších řádů, kde je následně hledán globální extrém.

#### 6.1.2 KRIGING

Pro nalezení vhodné aproximace je zde použita **optimalizace hejnem částic (PSO)**<sup>34</sup> a **genetický algoritmus (GA)** [78]. Tyto metody jsou realizovány v toolboxu pyKriging vytvořeném pro python. PSO je implementováno jako *optimizer* ve funkci *train*. Parametry obou algoritmů byly nastaveny na 2D variantě optimalizace, které umožňují vykreslení metamodelů formou 3D grafů. Prvotní nastavení parametrů bylo provedeno podle doporučení toolboxu.

Velikost **populace** PSO byla nastavena na 30 jednotek, aby pokryla celý návrhový prostor. Částice jsou ovlivňovány ostatními úspěšnějšími částicemi hejna. Algoritmus počítá pohyb hejna v diskrétních časových krocích a neustále upravuje hodnoty popisující částice. Hejno se pohybuje na území označovaném jako „**sousedství**“ (Neighborhood), které je předem určeno a omezuje maximální možný pohyb hejna, dle toolboxu zvoleno jako 20. *Toolbox pyKriging* využívá externího archivu a udržuje populaci předchozího kroku.

Velikost **populace** GA byla také nastavena na 30 jednotek v inicializaci, počáteční populace vzniká náhodně tak, aby vyplňovala návrhový plán. Pomocí částečně-náhodné výběrové metody bylo vybráno 10 jedinců s vysokou zdatností (**elites**). Další generace vznikla metodou **mutace** s koeficientem 0,25.

---

<sup>34</sup> Přeloženo z anglického „Particle Swarm Optimization - PSO“ [77]



## 6.2 NÁVRHOVÝ PROSTOR

### 6.2.1 RESPONZNÍ PLOCHY

**Haltonova sekvence.**<sup>35</sup> Generátor kvazináhodných sekvencí. Kvazináhodné sekvence jsou navrženy tak, aby se jejich body co nejvíce „navzájem vyhýbaly“. Báze Haltonovy sekvence je prvočíslo.

**Plně faktoriální prostor**<sup>36</sup> (UFP). Body rozdělené ve 2D prostoru po stejných vzdálenostech. Rozložení bodů není náhodné.

### 6.2.2 KRIGING – LATINSKÁ HYPERKOSTKA<sup>37</sup>

Latinská hyperkostka (LHC) je statistická metoda pro generování semi-náhodných vzorků parametrů vícerozměrné distribuce. Při řešení 2D varianty může nastat situace, kdy jsou vzájemné rozsahy návrhových proměnných rozdílné, proto je třeba pro správné fungování **PSO** a **GA** rozměry normalizovat do jednotkové hyperkostky. Díky použití návrhového prostoru latinská hyperkostka jsou proměnné normalizovány.

Kriging používá schopnosti vyplnění návrhového prostoru, která vyhodnocuje kritické body a v jejich blízkosti tvoří další body použité v následném průběhu, množství těchto bodů je pevně nastavené a označené jako **INFILL**. Tato schopnost následně rozděluje tvorbu modelu na iterace, označené jako **ITER**.

## 6.3 HODNOCENÍ KVALITY TECHNIK

Hodnocení techniky je provedeno za pomoci **determinačního** koeficientu  $R^2$ .

Koeficient nabývá hodnot 0 až 1, kde čím vyšší hodnoty tím lepší je aproximační schopnost hodnoceného metamodelu.

$$R^2 = \frac{SS_M}{SS_T} = \left(1 - \frac{SS_E}{SS_T}\right) 100[\%] \quad (34)$$

$SS_M$  je součet modelu,  $SS_T$  je celkový součet čtverců,  $SS_E$  je součet čtverců rezidua a  $R^2$  je koeficient determinace.

$$SS_M = \sum_{i=1}^n (Y'(X_i) - Y')^2 \quad (35)$$

<sup>35</sup> Přeloženo z anglického „Halton sequence“[81]

<sup>36</sup> Přeloženo z anglického „Full factorial“[81]

<sup>37</sup> Přeloženo z anglického „Latin hypercube“



$$SS_T = \sum_{i=1}^n (Y(\mathbf{X}_i) - Y')^2 \quad (36)$$

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (Y(\mathbf{X}_i) - Y'(\mathbf{X}_i))^2 \quad (37)$$

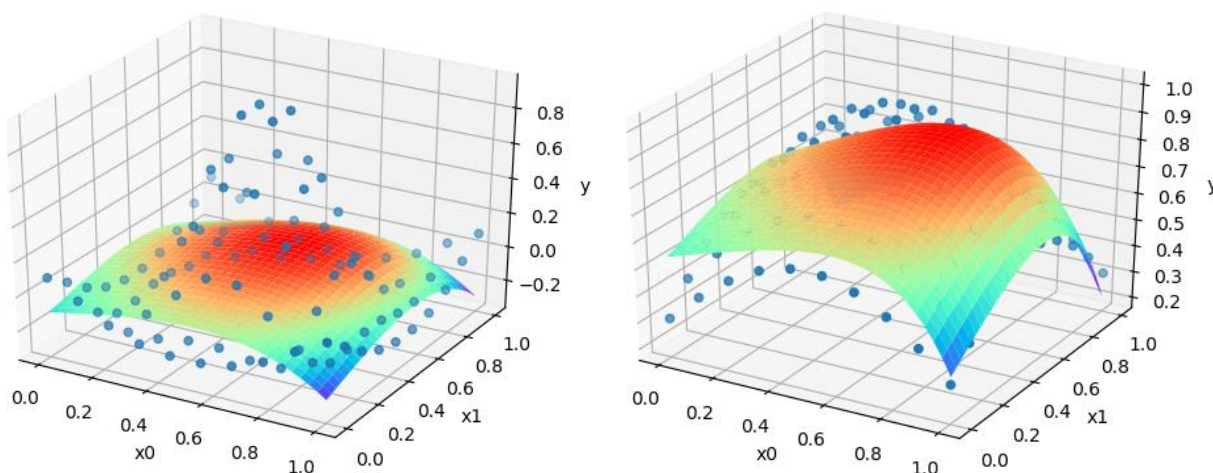
$$Y' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y(\mathbf{X}_i) \quad (38)$$

$Y'$  je aproximace metamodelu,  $Y$  je výstupní (závislá) proměnná,  $\mathbf{X}_i$  jsou vstupní hodnoty. Determinační koeficient s výsledkem  $R^2=1$  ukazuje perfektní pozitivní korelaci.

## 6.4 TESTOVACÍ FUNKCE PRO SESTAVENÍ METAMODELU

Jako testovací funkce pro sestavení metamodelu byla zvolena Rickerova vlna<sup>38</sup>, jinak označována jako funkce mexický klobouk nebo sombrero, a to kvůli její malé výpočtové náročnosti a možnosti použití ve 3D (při sestavení návrhového prostoru).

### 6.4.1 TECHNIKA RESPONZNÍCH PLOCH



Obr. 22 Návrhový prostor UFP 10x10, vykreslení pomocí polynomu 2.(vlevo) a 10. řádu (vpravo)  
[Vlastní zdroj]

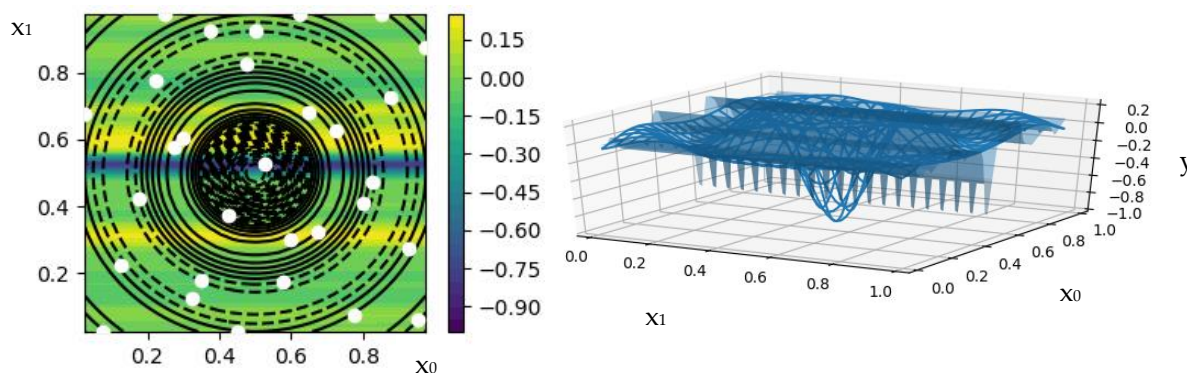
Technika je používána pro zkoumání návrhového prostoru dle 1.1

<sup>38</sup> Přeloženo z anglického: „Ricker wavelet“ [79]

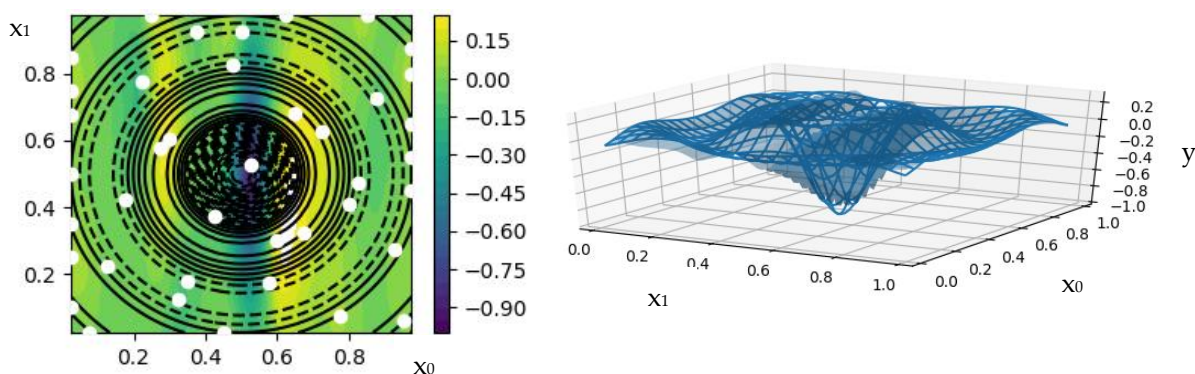
### 6.4.2 TECHNIKA KRIGING

Pro techniku kriging bylo provedeno několik sérií výpočtů s použitím testovací funkce.

Pro sérii testování modelů byl zvolen návrhový prostor LHC ve dvou dimenzích s rozměrem 20, ten byl následně vyhodnocen algoritmy PSA a GA v 10ti iteracích ITER. Počet bodů INFILL je 10. Výsledky jsou normalizovány do rozměru 0 až 1.



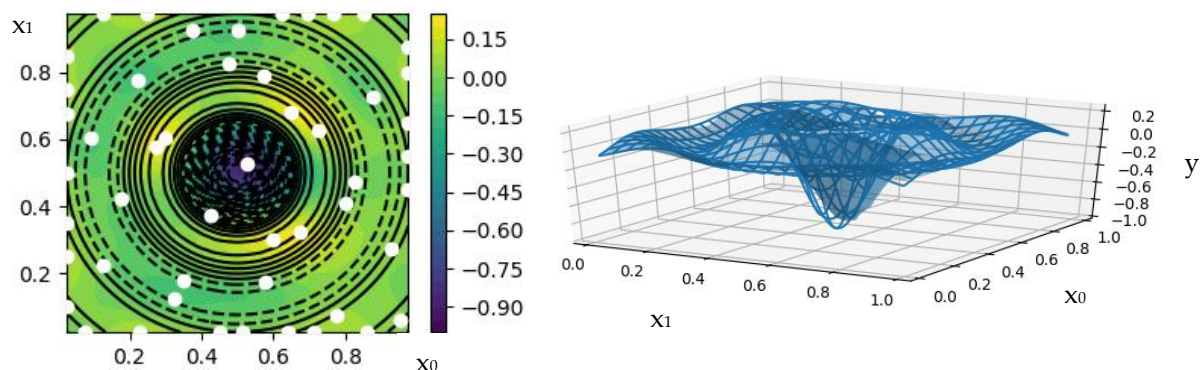
Obr. 23 1. Iterace metamodelu, algoritmu PSA, lze pozorovat dominantní hledání extrému v ose  $x$ . Drátový model označuje ideální funkci Rickerova vlna pro lepší vizuální ověření (ve 2D řezu černě) [Vlastní zdroj]



Obr. 24 2. Iterace metamodelu, algoritmu PSA, lze pozorovat dominantní hledání extrému v ose  $y$  [Vlastní zdroj]

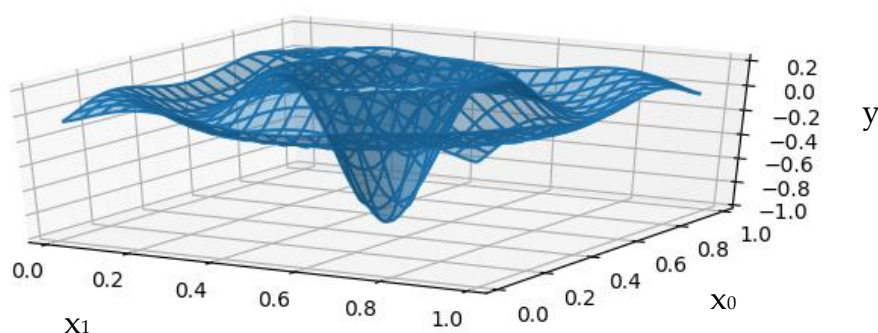
Jak je možné pozorovat v průběhu prvních tří iterací, pro PSO, algoritmus sestavuje aproximaci postupně ve všech dimenzích prohledávaného prostoru. Dále lze ve 2D řezích pozorovat tvorbu kritických bodů, které jsou vždy vyhodnoceny v následující iteraci.





Obr. 25 3. Iterace metamodelu, algoritmu PSA, nalezení oblasti extrému v návrhovém prostoru [Vlastní zdroj]

Počet iterací byl zvolen jako 10, již při sedmé iteraci lze však pozorovat, že metamodel aproximuje funkci velmi přesně, čemuž zároveň odpovídá determinační koeficient.



Obr. 26 7. Iterace, determinační koeficient blízký 1 [Vlastní zdroj]

Tabulka 2 Determinační koeficienty aproximace Rickerovy funkce pro 10 iterací.

Iterace	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R2	0,372	0,478	0,254	0,256	0,378	0,689	0,968	0,998	0,998	0,999

Tabulka 3 Časový interval techniky kriging

Iterace	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Čas [s]	45	77	98	95	119	213	289	380	548	532
Celkový čas [s]	2401									



## 6.5 TESTOVÁNÍ TECHNIKY KRIGING NA VÝPOČTOVÉM MODELU LOŽISKA

Po úspěšném sestavení metamodelu bylo provedeno množství testovacích výpočtů za účelem zjištění vhodného nastavení funkcí techniky tvorby metamodelu pro výpočtový model ložiska.

Nejprve byly se stejným nastavením provedeny výpočty pro porovnání optimalizačních algoritmů.

*Tabulka 4 Parametry techniky s použitím PSO*

Parametr (nezávislá proměnná)	Hodnota
LHC	10
ITER	5
INFILL	10
Optimalizační algoritmus	PSO
Populace	30
Sousedství	20
Sklon funkční plochy, [°]	2,4998861
Poměr velikosti funkční plochy [-]	0,7374643
Třecí moment [N.m]	1,11359745
Čas výpočtu [sec]	1 334

*Tabulka 5 Parametry techniky s použitím GA*

Parametr (nezávislá proměnná)	Hodnota
LHC	10
ITER	5
INFILL	10
Optimalizační algoritmus	GA
Populace	30
Elites	10
Mutace	0,25
Sklon funkční plochy, [°]	1,6924485
Poměr velikosti funkční plochy [-]	0.55000001
Třecí moment [N.m]	4,42617977
Čas výpočtu [sec]	1 312



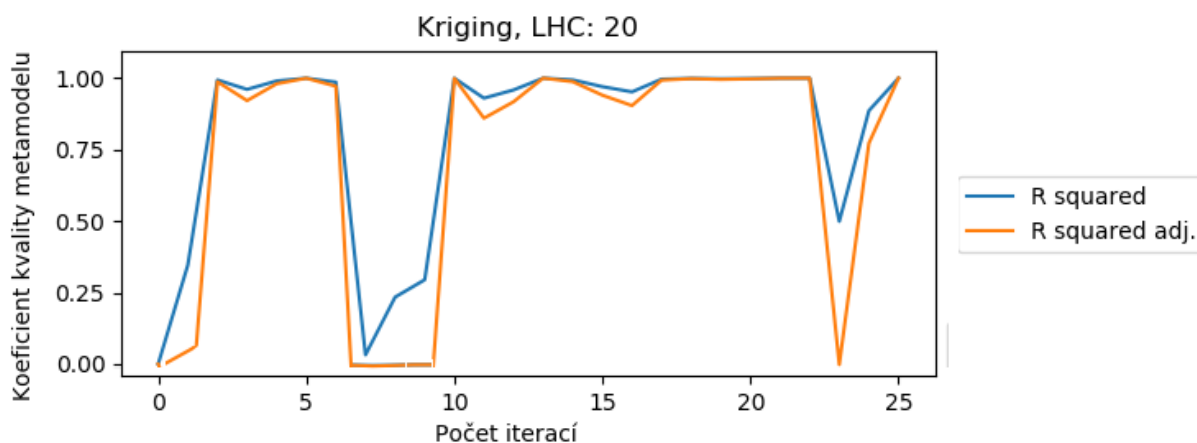


Po porovnání předběžných výsledků byl dále zvolen algoritmus PSO. Následně byl proveden výpočet s algoritmem PSO, ve kterém byl použit větší rozměr LHC (20) a vyšší počet iterací ITER (25), aby bylo dosaženo nejlepšího možného výsledku a byl prozkoumán vliv počtu iterací na hodnotu výsledného parametru.

Tabulka 6 Parametry techniky pro vyšší počet iterací

Parametr (nezávislá proměnná)	Hodnota
LHC	20
ITER	25
INFILL	10
Optimalizační algoritmus	PSO
Populace	300
Sousedství	50
Sklon funkční plochy, [°]	1,8479456
Poměr velikosti funkční plochy [-]	0,89735424
Třecí moment [N.m]	0,89928064
Čas výpočtu [sec]	32 461

Průběh determinačního koeficientu je zobrazen na Obr. 27. Je zde viditelné, že k nalezení kvalitní aproximace dochází již při 5. iteraci.



Obr. 27 Korelační koeficient v závislosti na počtu iterací [Vlastní zdroj]



## 7 VÝSLEDKY

Po sestavení metamodelů byla provedena optimalizace pomocí metody Nelder-Mead <sup>39</sup>, která je implementována v *toolboxu SciPy*. Za účelem získání globálního extrému byla optimalizace prováděna pro sérii náhodně generovaných počátečních bodů.

Označení optimalizovaných parametrů:

**UPAD** Sklon funkční plochy, [°]

**SPAD** Poměr velikosti funkční plochy vůči celkové velikosti segmentu [-]

### 7.1 RESPONZNÍ PLOCHY

Pro popis metody responzních ploch byly vybrány nejlépe hodnocené body polynomů 4. řádu, neboť nejlépe popisuje zkoumaný prostor.

#### 7.1.1 PLNĚ FAKTORIÁLNÍ PROSTOR

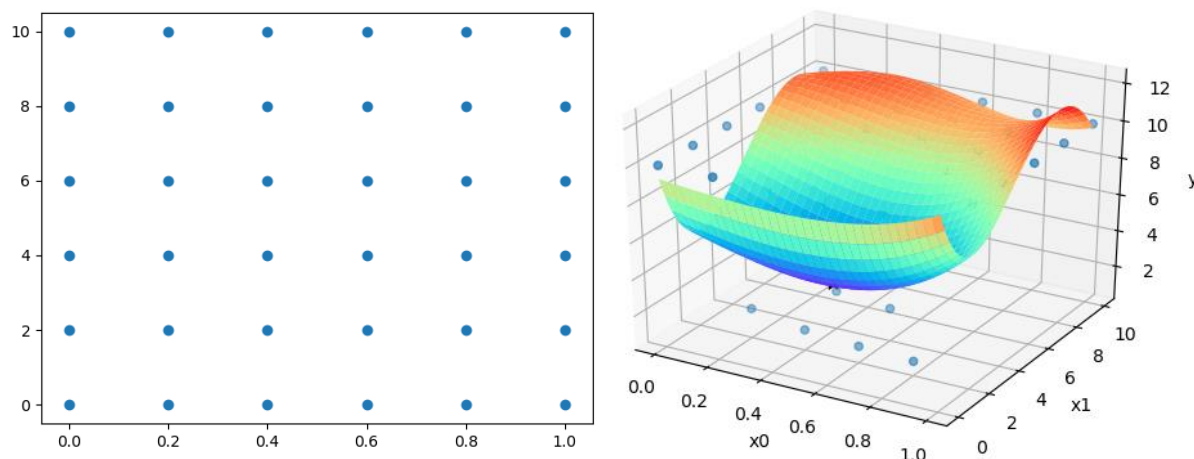
*Tabulka 7 Nalezené hodnoty optimalizovaných parametrů techniky Responzních ploch*

Počet bodů	Optimalizovaný parametr	
	SPAD	UPAD
UFP 4x4 (16)	0,44817148	4,36996032
UFP 5x5 (25)	0,48967713	3,33458389
UFP 6x6 (36)	0,47590301	2,54219219
UFP 7x7 (49)	0,49462531	2,91658804
UFP 8x8 (64)	0,51116038	2,97315396
UFP 9x9 (81)	0,50248305	2,51079524
UFP 10x10 (100)	0,47360648	2,5856333
UFP 20x20 (400)	0,51964886	2,29382631

*Tabulka 8 Determinační koeficienty aproximace modelu pro UFP.*

Počet bodů	16	25	36	49	64	81	100	400
R2	0,399	0,448	0,441	0,452	0,450	0,521	0,481	0,538

<sup>39</sup>Numerická metoda pro hledání extrému funkce [82]



Obr. 28 UFP 6x6, návrhový prostor a ukázka aproximace pro polynom řádu 4 [Vlastní zdroj]

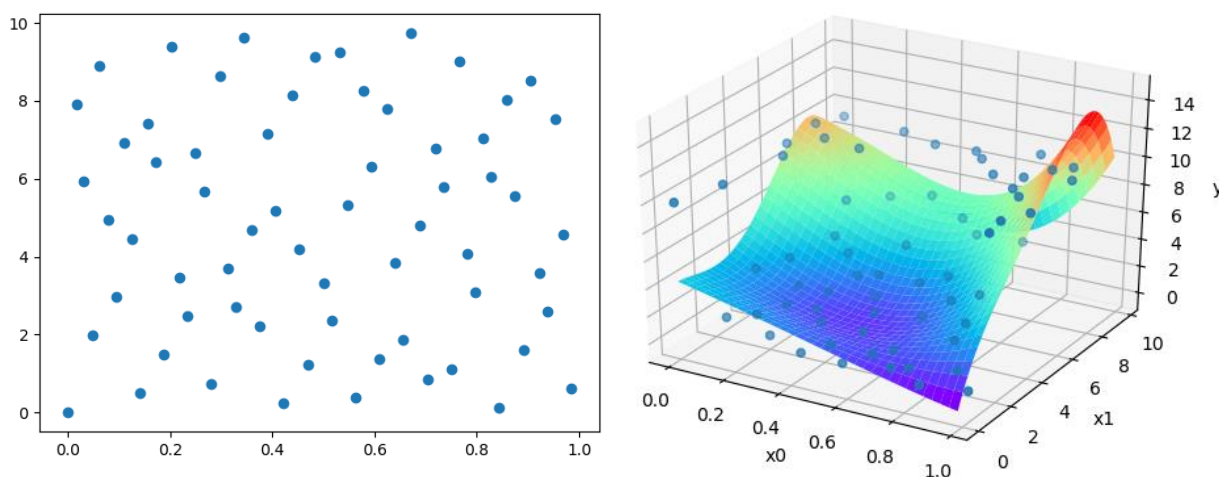
### 7.1.2 HALTONOVA SEKVENCE

Tabulka 9

Počet bodů	Optimalizovaný parametr	
	SPAD	UPAD
Halton 16	0,31819264	2,84425543
Halton 32	0,41996706	2,73509442
Halton 64	0,49190646	2,69936201
Halton 128	-	-
Halton 256	0,63921616	1,00262274

Tabulka 10 Determinační koeficienty aproximace modelu pro UFP.

Počet bodů	16	32	64	128	256
R2	0,772	0,715	0,659	0,635	0,657

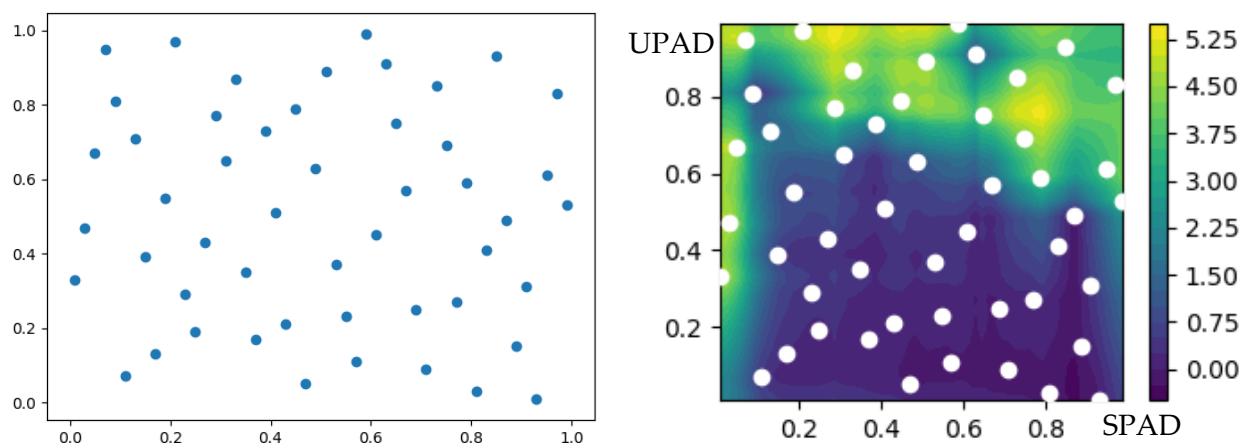


Obr. 29 Halton 64, návrhový prostor a ukázka aproximace pro polynom řádu 4 [Vlastní zdroj]

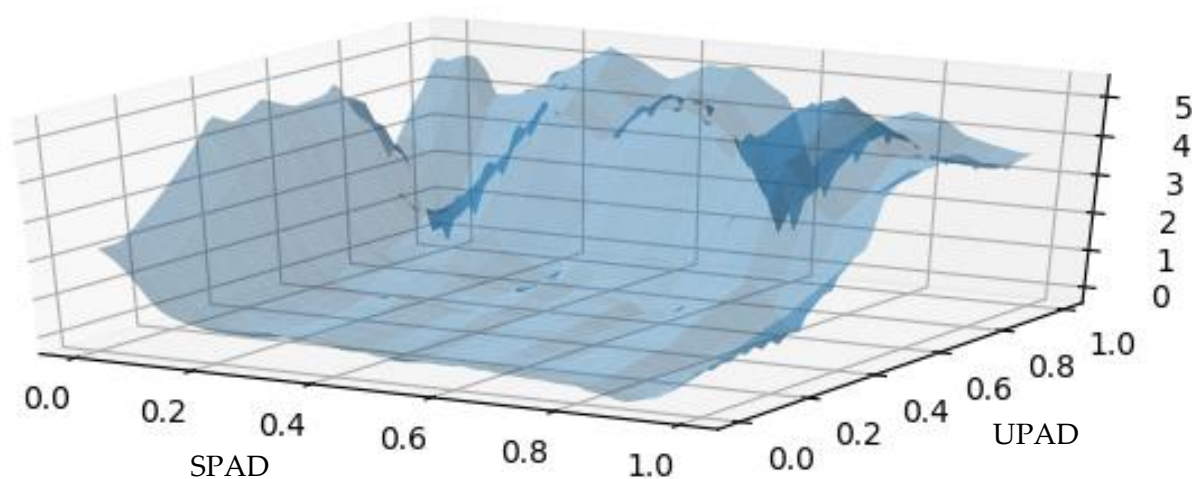
## 7.2 KRIGING

Tabulka 11 Nalezené hodnoty optimalizovaných parametrů techniky kriging LHC 50, ITER 1

Iterace	Počet bodů	Optimalizovaný parametr		Třetí moment [N.m]	Čas iterace [s]
		SPAD	UPAD		
0	LHC 50	0,8987253	0,04952378	0,64876554	382
1	LHC50 +10	0,9013249	0,05123419	0,64359844	520



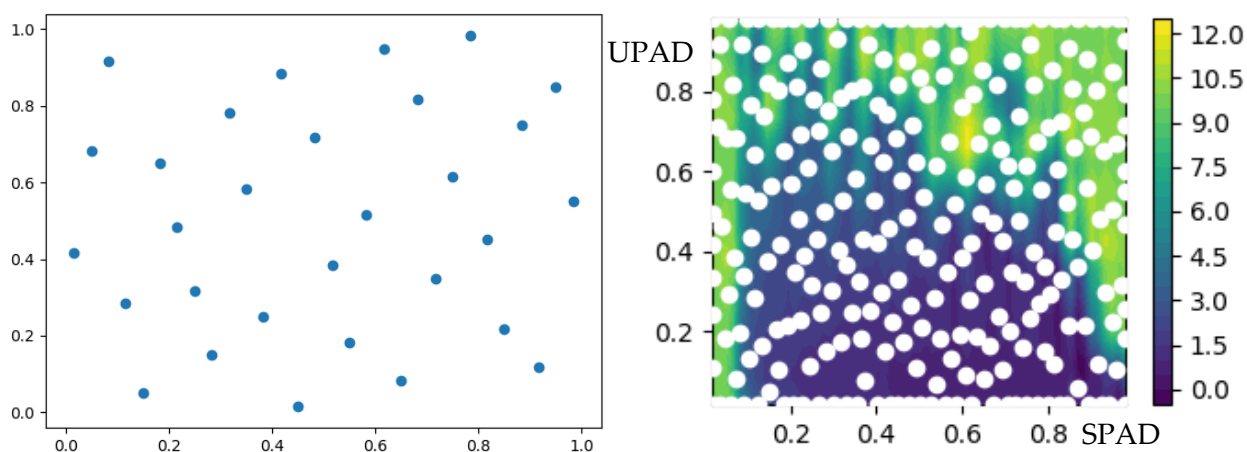
Obr. 31 LHC 50, návrhový prostor a konturový graf pro nultou iteraci [Vlastní zdroj]



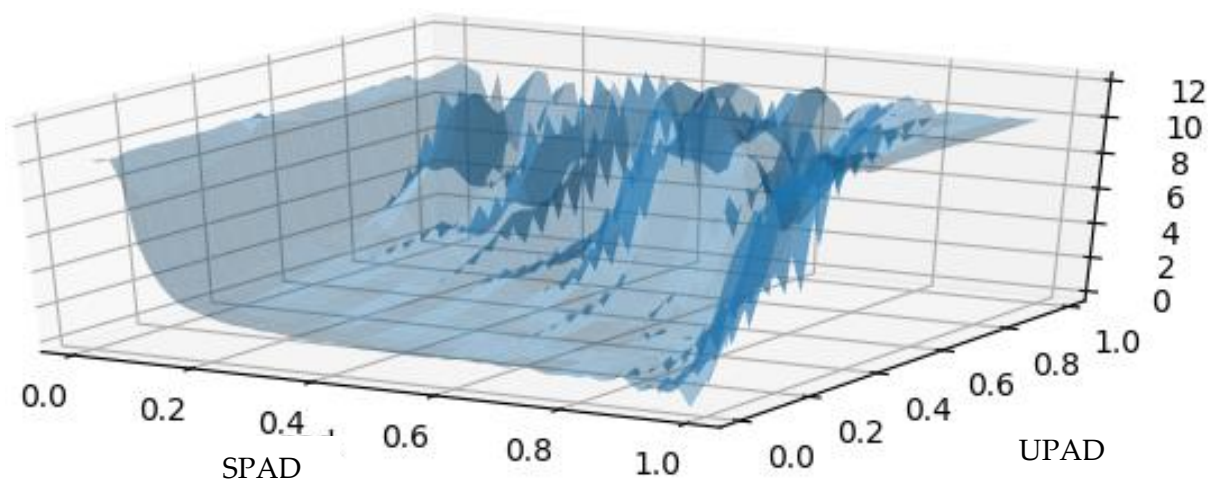
Obr. 30 LHC 50 3D Graf aproximace pro nultou iteraci [Vlastní zdroj]

Tabulka 12 Nalezené hodnoty optimalizovaných parametrů techniky kriging LHC 30, ITER 10

Iterace	Počet bodů	Optimalizovaný parametr		Třecí moment [N.m]	Čas iterace [s]
		SPAD	UPAD		
0	LHC 30	0,81666343	0,11736722	0,73267659	152
1	LHC30 + 30	0,82424267	0,11658936	0,77670750	941
2	LHC30 + 60	0,81666558	0,30398786	1,27920383	924
3	LHC30 + 90	0,84999998	0,10811250	0,83521395	829
4	LHC30 + 120	0,87152450	0,24159033	1,08290215	1284
5	LHC30 + 150	0,87152147	0,21801491	0,99598561	1523
6	LHC30 + 180	0,91666493	0,01703158	0,74393931	2399
7	LHC30 + 210	0,87153430	0,12078013	0,72554379	2774
8	LHC30 + 240	0,8888296	0,04140211	0,64897055	4053
9	LHC30 + 270	0,8223267	0,55354666	1,81763849	8454
10	LHC30 + 300	0,88879602	0,10217162	0,68809216	10316



Obr. 32 LHC 30, návrhový prostor pro nultou iteraci a konturový graf pro nultou iteraci [Vlastní zdroj]



Obr. 33 LHC 30 3D Graf aproximace pro osmou iteraci [Vlastní zdroj]



## 8 DISKUZE

### 8.1 TECHNIKA RESPONZNÍCH PLOCH

Technika responzních ploch byla použita pro prozkoumání návrhového prostoru. Pro metodu je dle Montgomeryho [29] relevantní použití polynomů prvního a druhého řádu polynomů. Za účelem prozkoumání návrhového prostoru byly použity polynomy řádu 2 až 10. Ukázalo se, že použití polynomů vyššího řádu než 4. je již nevhodné. Přestože získané aproximace poskytují přibližnou představu o zkoumaném systému, nejsou tyto vhodné pro přesné hledání globálního extrému. Aproximovaný systém je příliš komplexní pro použití techniky responzních ploch.

### 8.2 TECHNIKA KRIGING

Technika kriging byla úspěšně aplikována pro tvorbu metamodelu nad výpočtovým modelem a dosáhla podobných výsledků jako přímá optimalizace. Jako relevantní výsledky jsou považovány hodnoty v okolí 1 N.m, výrazně vyšší hodnoty (10+ N.m) byly ořezány.

Nevýhodou techniky kriging je vysoká časová náročnost pro vytvoření modelu, v porovnání s metodou přímé optimalizace není trvání procesu výrazně odlišné a pro praktické použití je tedy třeba zvážit přímou optimalizaci pomocí GA.

### 8.3 PŘÍMÁ OPTIMALIZACE POMOCÍ GENETICKÉHO ALGORITMU

Za účelem ověření hodnot optimalizovaných geometrických parametrů hledaných v rámci vytvořených metamodelů byla s použitím genetického algoritmu provedena optimalizace přímo na úrovni výpočtového modelu. Výsledky jsou uvedeny v tab. 13.

*Tabulka 13 Nezávislé proměnné získané přímou optimalizací genetického algoritmu*

Nejlepší jedinci	Optimalizovaný parametr		Třetí moment [N.m]
	SPAD	UPAD	
1	0,924	0,54	0,64144
2	0,919	0,54	0,64156
3	0,917	0,54	0,64159
4	0,921	0,52	0,64163
5	0,924	0,52	0,64164



## ZÁVĚR

Diplomová práce se v rešeršní části zabývá nejprve vysvětlením pojmu metamodelování a jeho umístěním v rámci optimalizace. Dále popis jednotlivých technik metamodelování, z nichž jsou dvě použity v praktické části, a to technika responzních ploch a kriging.

Cílem práce je návrh výpočtového modelu proudění oleje v mazací vrstvě axiálního ložiska turbodmychadlo, proto je dále obecně popsáno turbodmychadlo, jeho konstrukce, systém mazání a umístění a význam axiálního ložiska.

Poslední částí rešerše je popis proudění viskózní kapaliny tenkými mezerami a jeho výpočet.

V praktické části je nejprve vysvětlen výpočtový model proudění. Následuje série dvou metamodelů, které jsou nejprve zkoumány na adekvátní testovací funkci a následně posazeny na výpočtový model. Zhodnocení obou technik metamodelování je následně shrnuto v diskuzi, která obsahuje porovnání s technikou přímé optimalizace pomocí genetického algoritmu.





## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Metamodel-Based Design Optimization – A Multidisciplinary Approach for Automotive Structures; Ann-Britt Ryberg; 2013
- [2] Kroo, I., and Manning, V. (2000). Collaborative optimization: status and directions. AIAA-2000-4721. 8th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Long Beach, California, USA.
- [3] SUCHOMEL O. Optimalizační metody v CFD – diferenciální evoluce, Praha. skriptum, Fakulta strojní ČVUT, Ú 12107.1 - Odbor mechaniky tekutin a termodynamiky. Dostupné z: [www.suchomel.org/files/Optimalizace-v-CFD.pdf](http://www.suchomel.org/files/Optimalizace-v-CFD.pdf)
- [4] DOSTÁL Z., BEREMLIJSKI P. Metody optimalizace – interaktivní verze, 2012, Prezentace, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava a Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: [http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metody\\_optimalizace\\_obr.pdf](http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metody_optimalizace_obr.pdf)
- [5] KAMRAN I., Fundamental Engineering Optimization Methods Second Edition, 2013. ISBN 13: 978-87-403-0489-3 Dostupné z: <http://www.ist.edu.pk/downloads/cacss/workshops/national/optimum-engineering-design-workshop/fundamental-engineering-optimization-methods-2e.pdf>
- [6] POPELA, R., Využití optimalizačních metod při aerodynamickém návrhu letounu, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. 34 s. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Karol Filakovský, CSc. ISBN 80-214-3038-9.
- [7] Koch, P. N., Simpson, T. W., Allen, J. K. and Mistree, F., 1999, "Statistical Approximations for Multidisciplinary Design Optimization: The Problem of Size," Journal of Aircraft, 36(1), pp.275-286.
- [8] Wang, G. G. and Shanks., 2007, Review of Metamodeling Techniques in Support of Engineering Design Optimization, Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design, 129, pp. 370-389.
- [9] T. W. Simpson, J. D. Peplinski, P. N. Koch and J. K. Allen. (2001) Metamodels for Computer-based Engineering Design: Survey and recommendations. Engineering with Computers 17: 129–150.





- [10] Metamodel-Based Design Optimization – A Multidisciplinary Approach for Automotive Structures; Ann-Britt Ryberg; 2013, pp. 6
- [11] Ullman, D. G., 2002, "Toward the Ideal Mechanical Engineering Design Support System," Research in Engineering Design, 13, pp. 55-64.
- [12] Types of Optimization Problems | NEOS. NEOS | Optimization Tools and Guides [online]. Copyright ©2019 [cit. 12.04.2019]. Dostupné z: <https://neos-guide.org/optimization-tree>
- [13] Wang, G. G. and Shanks., 2006, Review of Metamodeling Techniques in Support of Engineering Design Optimization, Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design, 42, pp. 9-11
- [14] Multivariate Adaptive Regression Splines (MARSplines). [online]. Copyright © 2019 TIBCO Software Inc All Rights Reserved. [cit. 12.04.2019]. Dostupné z: <http://www.statsoft.com/Textbook/Multivariate-Adaptive-Regression-Splines>
- [15] Sauer, T. Numer. Math. (1997) Polynomial interpolation of minimal degree, 78: 59. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s002110050304>
- [16] Nathalie Villa-Vialaneix, Marco Follador, Marco Ratto, Adrian Leip. A comparison of eight metamod-eling techniques for the simulation of N2O fluxes and N leaching from corn crops. Environmental Mod-elling and Software, Elsevier, 2012, 34, pp.51-66. <10.1016/j.envsoft.2011.05.003>. <hal-00654753>
- [17] ŠŤASTNÝ, A. Modelování silových účinků působících na dopravní a manipulační zařízení s cílem jejich optimalizace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 113s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.
- [18] NAULT, É. SOLAR POTENTIAL IN EARLY NEIGHBORHOOD DESIGN A Decision-Support Workflow Based on Predictive Models, Lausanne, 2016, 309p
- [19] Metamodel-Based Design Optimization – A Multidisciplinary Approach for Automotive Structures; Ann-Britt Ryberg; 2013, pp. 17-22
- [20] Bouhlel, M.A.; Hwang, J.H.; Bartoli, Nathalie; Lafage, R.; Morlier, J.; Martins, J.R.R.A. (2019). "A Python surrogate modeling framework with derivatives". Advances in Engineering Software. doi:10.1016/j.advengsoft.2019.03.005.



- [21] Shetty, S. Efficient reliability-based optimization using a combined metamodel and FE-based strategy, Volvo Car Corporation, Sweden, part of Engineering Optimization IV – Rodrigues et al. (Eds), 2015 Taylor and Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02725-1
- [22] METAMODELS FOR COMPUTER-BASED ENGINEERING DESIGN: SURVEY AND RECOMMENDATIONS Timothy W. Simpson, Jesse Peplinski, Patrick N. Koch, and Janet K. Allen t, pp. 10-15
- [23] METAMODELS FOR COMPUTER-BASED ENGINEERING DESIGN: SURVEY AND RECOMMENDATIONS Timothy W. Simpson, Jesse Peplinski, Patrick N. Koch, and Janet K. Allen t, pp. 3
- [24] Wikipedia contributors. (2018, November 23). Box–Behnken design. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 17:09, April 25, 2019, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Box%E2%80%93Behnken\\_design&oldid=870286296](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Box%E2%80%93Behnken_design&oldid=870286296)
- [25] Wikipedia contributors. (2017, November 3). Plackett–Burman design. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 17:09, April 25, 2019, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Plackett%E2%80%93Burman\\_design&oldid=808567009](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Plackett%E2%80%93Burman_design&oldid=808567009)
- [26] Wikipedia contributors. (2019, March 5). Latin hypercube sampling. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 17:08, April 25, 2019, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Latin\\_hypercube\\_sampling&oldid=886324651](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Latin_hypercube_sampling&oldid=886324651)
- [27] Statistics Solutions. (2013). What is Linear Regression [WWW Document]. Dostupné z: <https://www.statisticssolutions.com/what-is-linear-regression/>
- [28] Wikipedia contributors. (2019, February 19). Curve fitting. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 07:17, April 15, 2019, Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Curve\\_fitting&](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Curve_fitting&)
- [29] MONTGOMERY, D., Design and analysis of experiments, 5th ed., Arizona State University, ISBN 0-471-31649-0, 1997, pp. 422
- [30] Wikipedia contributors. (2019, April 6). Kriging. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 08:41, April 12, 2019, Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kriging&oldid=891239708>



- [31] Wikipedia contributors. (2019, April 25). Smoothness. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 07:55, April 26, 2019, from <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Smoothness&oldid=894014007>
- [32] Wikipedia contributors. (2019, January 25). Best linear unbiased prediction. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 07:56, April 26, 2019, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Best\\_linear\\_unbiased\\_prediction&oldid=880108285](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Best_linear_unbiased_prediction&oldid=880108285)
- [33] COMPUTATION ASPECTS OF KRIGING IN CHOSEN ENGINEERING PROBLEMS Martina Valtrová
- [34] Welch, W. J., Yu, T.-K., Kang, S. M. and Sacks, J., "Computer Experiments for Quality Control by Parameter Design," *Journal of Quality Technology*, 1990, 22(1): pp. 15-22.
- [35] Wikipedia contributors. (2019, April 22). Covariance. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 07:54, April 26, 2019, from <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Covariance&oldid=893627194>
- [36] Chen C.S., Hon Y.C., Schaback R.A. *Scientific Computing with Radial Basis Functions* 2007, pp. 1-18.
- [37] Radial basis function. Scholarpedia. [Online] [Citace: 19.11. 2018.] [http://www.scholarpedia.org/article/Radial\\_basis\\_function](http://www.scholarpedia.org/article/Radial_basis_function)
- [38] Gutierrez-Osuna, R.L19: radial basis functions. Copyright ©X [cit. 13.04.2019]. pp.3 Dostupné z: [http://research.cs.tamu.edu/prism/lectures/pr/pr\\_119.pdf](http://research.cs.tamu.edu/prism/lectures/pr/pr_119.pdf)
- [39] Chen C.S., Hon Y.C., Schaback R.A. *Scientific Computing with Radial Basis Functions* 2007, pp. 18.
- [40] Radial basis function. Wikipedia the Free Encyclopedia. [Online] [Citace: 19.11. 2018.] Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Radial\\_basis\\_function](http://en.wikipedia.org/wiki/Radial_basis_function)
- [41] Příspěvatelé Wikipedie, Umělá neuronová síť [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2018, Datum poslední revize 20. 09. 2018, 06:39 UTC, [citováno 4. 05. 2019] Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Um%C4%9Bl%C3%A1\\_neuronov%C3%A1\\_s%C3%AD%C5%A5&oldid=16470833](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Um%C4%9Bl%C3%A1_neuronov%C3%A1_s%C3%AD%C5%A5&oldid=16470833)



- [42] ŠÁROVEC, Marek. Uložení rotorů turbodmychadel na valivých ložiscích. Brno, 2017. 71 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Pavel NOVOTNÝ, PhD.
- [43] Fundamentals – Turbo One. *Turbo One – Asia's Leading Turbo Distributor* [online]. Dostupné z: <https://www.turbo.com.sg/fundamental.html>
- [44] Basic - Garrett. Garrett® ▷ Turbo Technology / Electric & Hybrid / Connected Vehicles GTX [online]. Copyright © 2019 Garrett Motion Inc. [cit. 13.04.2019]. Dostupné z: <https://www.garrettmotion.com/turbocharger-technology/how-a-turbo-works/basic/>
- [45] Basic - Garrett. Garrett® ▷ Turbo Technology / Electric & Hybrid / Connected Vehicles GTX [online]. Copyright © 2019 Garrett Motion Inc. [cit. 12.04.2019]. Dostupné z: <https://www.garrettmotion.com/turbocharger-technology/how-a-turbo-works/basic/>
- [46] Turbodmychadlo I. *AutoZnalosti.cz* [online]. Dostupné z: <http://www.autoznalosti.cz/index.php/motor/8-turbodmychadlo.html>
- [47] Köhler. Turbochargers in the workshop, Technology, variants, troubleshooting. Krafthand Medien GmbH Walter-Schulz-Straße 1 · 86825 Bad Wörishofen. ISBN: 978-3-87441-158-5.
- [48] What's turbo lag and can we reduce it? - BBC Science Focus Magazine. BBC Science Focus Magazine - science, nature, technology, Q&As - BBC Science Focus Magazine [online]. Copyright © Immediate Media Company Ltd 2019. [cit. 15.04.2019]. Dostupné z: <https://www.sciencefocus.com/future-technology/whats-turbo-lag-and-can-we-reduce-it/>
- [49] Pneumatic or electric actuators: When and why | Machine Design. Machine Design [online]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/mechanical-drives/pneumatic-or-electric-actuators-when-and-why>
- [50] Series 60 Turbine Housing, Wastegate Assembly 451911-0028. M&D Distributors [online]. Copyright © 2019 M [cit. 13.04.2019]. Dostupné z: <https://www.mddistributorsstore.com/garrett/451911-0028/turbocharger-turbine-housing-with-wastgate-assembly>



- [51] Variable Geometry Turbos for Diesel Engines - Garrett. Garrett® ▷Turbo Technology / Electric & Hybrid / Connected Vehicles GTX [online]. Copyright © 2019 Garrett Motion Inc. [cit. 04.05.2019]. Dostupné z: <https://www.garrettmotion.com/turbocharger-technology/diesel-turbochargers/variable-geometry-turbos-for-diesel-engines/>
- [52] Spannerhead [online]. Dostupné z: [http://www.spannerhead.com/wp-content/uploads/2011/12/VATN\\_Turbo\\_1.jpg](http://www.spannerhead.com/wp-content/uploads/2011/12/VATN_Turbo_1.jpg)
- [53] SJÖBERG, E. Friction Characterization of Turbocharger Bearings, Master of Science Thesis MMK 2013:06 MFM 149, KTH Industrial Engineering and Management, Machine Design, SE-100 44 STOCKHOLM, pp. 5-9
- [54] SJÖBERG, E. Friction Characterization of Turbocharger Bearings, Master of Science Thesis MMK 2013:06 MFM 149, KTH Industrial Engineering and Management, Machine Design, SE-100 44 STOCKHOLM, pp. 5
- [55] SPECIAL TURBO a.s. - Turbodmychadlo s kluznými ložisky. SPECIAL TURBO a.s. - *prodej a opravy turbodmychadel a viskózních ventilátorů* [online]. Dostupné z: [http://www.specialturbo.cz/turbodmychadlo/turbodmychadlo\\_s\\_kluznymi\\_lozisky/cz](http://www.specialturbo.cz/turbodmychadlo/turbodmychadlo_s_kluznymi_lozisky/cz)
- [56] DOBROVOLNÝ, O. *Moderní trendy v konstrukci kluzných ložisek turbodmychadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 41s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Knotek.
- [57] BorgWarner.Inc.BorgWarner Inc.[online]. 2019 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.borgwarner.com/en/default.aspx>
- [58] Turbo Tech: Turbo Bearings - MotoIQ. *MotoIQ - Motorsport Tech, Builds, Product Tests & Racing* [online]. Dostupné z: <https://motoiq.com/Turbo-Tech-Turbo-Bearings/>
- [59] Foto Jan Příbyl (Autor práce)
- [60] SJÖBERG, E. Friction Characterization of Turbocharger Bearings, Master of Science Thesis MMK 2013:06 MFM 149, KTH Industrial Engineering and Management, Machine Design, SE-100 44 STOCKHOLM, pp. 8



- [61] HEISLER, Heinz. Advanced engine technology. Warrendale, PA: SAE International, c1995, 794 s. ISBN 15-609-1734-2. pp. 319.
- [62] MACINNES, Hugh. Turbochargers. Tucson, AZ: H. P. Books, c1976. ISBN 09-126-5649-2.
- [63] Upraveno MACINNES, Hugh. Turbochargers. Tucson, AZ: H. P. Books, c1976. ISBN 09-126-5649-2. Pp. 22.
- [64] Design and Function of a Turbocharger - Bearing system | BorgWarner Turbo Systems [online]. Copyright ©2002 [cit. 26.04.2019]. Dostupné z: <http://www.turbos.bwauto.com/en/products/turbochargerBearingSystem.aspx>
- [65] DRÁBKOVÁ S. Mechanika tekutin, Ostrava, 2007. skriptum, VŠB – TUO, ISBN 978-80-248-1508-4.
- [66] JANALÍK, Jaroslav. Hydrodynamika a hydrodynamické stroje. Ostrava, 2008. Studijní opory. Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [67] NAKYAMA Y.: Introduction to Fluid Mechanics. 1998. 0 340 67649 3. (EN)
- [68] HORI Y.: Hydrodynamic Lubrication. 2006. Springer-Verlag Tokyo Berlin Heidelberg New York. ISBN – 13 978-4-431-27898-6.
- [69] Cole, J. D., et al. "The Flow of a Viscous Compressible Fluid Through a Very Narrow Gap." *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 15, no. 3, 1967, pp. 605–617.
- [70] G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor, 4 - Hydrodynamic Lubrication, Engineering Tribology (Third Edition), Butterworth-Heinemann, 2006, Pages 103-204, ISBN 9780750678360.
- [71] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Boyleův–Mariottův zákon [online]. c2017 [citováno 5. 04. 2019]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Boyle%C5%AFv%E2%80%93Mariott%C5%AFv\\_z%C3%A1kon&oldid=15633076](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Boyle%C5%AFv%E2%80%93Mariott%C5%AFv_z%C3%A1kon&oldid=15633076)



- [72] Turbocharger Bearing Systems - Garrett. Garrett® ▷ Turbo Technology / Electric & Hybrid / Connected Vehicles GTX [online]. Copyright © 2019 Garrett Motion Inc. [cit. 19.05.2019]. Dostupné z: <https://www.garrettmotion.com/news/newsroom/article/turbocharger-bearing-systems/>
- [73] HORI Y.: Hydrodynamic Lubrication. 2006. Springer-Verlag Tokyo Berlin Heidelberg New York. ISBN – 13 978-4-431-27898-6. Page 56,57.
- [74] Gropper D., Harvey T., Wang L., Numerical analysis and optimization of surface textures for a tilting pad thrust bearing, [https://www.researchgate.net/figure/Pad-details-with-coordinate-system-b-tilting-pad-thrust-bearing-geometry-and-c\\_fig1\\_324239359](https://www.researchgate.net/figure/Pad-details-with-coordinate-system-b-tilting-pad-thrust-bearing-geometry-and-c_fig1_324239359)
- [75] Vytvořil KUKLA, L., Použito se svolením autora.
- [76] LIMPOUCH J., Metoda sítí (konečných diferencí). Praha 2000. Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Czech Technical University in Prague. Dostupné z: <http://kfe.fjfi.cvut.cz/~limpouch/numet/ode/node25.html>
- [77] Wikipedia contributors. (2019, May 17). Particle swarm optimization. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 14:58, May 19, 2019, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Particle\\_swarm\\_optimization&oldid=897481912](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Particle_swarm_optimization&oldid=897481912)
- [78] Příspěvatelé Wikipedie, Genetický algoritmus [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2017, Poslední revize 4. 10. 2017, 08:48 UTC, [citováno 19. 05. 2019] Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Genetick%C3%BD\\_algoritmus](https://cs.wikipedia.org/wiki/Genetick%C3%BD_algoritmus)
- [79] Wikipedia contributors. (2018, November 30). Mexican hat wavelet. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 12:28, May 20, 2019, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mexican\\_hat\\_wavelet&oldid=871374647](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mexican_hat_wavelet&oldid=871374647)
- [80] Turbo Dodge Forums. Turbo Dodge Forums : Turbo Dodge Forum for Turbo Mopars, Shelbys, Dodge Daytona, Dodge SRT-4, Chrysler PT Cruiser, Omni and more! [online]. Dostupné z: <https://www.turbododge.com/forums/f7/f28/721082-lm-map-86fsm-hockeysticks-clevite77-wga.html>



- [81] MYŠÁKOVÁ E., Metody pro tvorbu rovnoměrně rozprostřených návrhů. Praha 2012. ČVUT, Fakulta stavební. [online], Dostupné z:  
<http://mech.fsv.cvut.cz/wiki/images/d/d8/BP-2012-Mysakova.pdf>
- [82] Wikipedia contributors. (2019, May 11). Nelder–Mead method. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 14:32, May 23, 2019, from  
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nelder%E2%80%93Mead\\_method&oldid=896579715](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nelder%E2%80%93Mead_method&oldid=896579715)
-





## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Nejsou uvedeny zkratky vysvětlené v poznámkách.

$Re$	$[-]$	Reynoldsovo číslo
$v$	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost
$d$	$[m]$	průměr
$\nu$	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	kinematická viskozita
$Q_m$	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní průtok
$\rho$	$[kg \cdot m^3]$	hustota
$S$	$[m^2]$	plocha
$V$	$[m^3]$	objem
$t$	$[s]$	čas
$\vec{F}_s$	$[N]$	setrvačná síla
$\vec{F}_0$	$[N]$	vnější síla
$\vec{F}_p$	$[N]$	tlaková síla
$\vec{F}_t$	$[N]$	třecí síla
$p$	$[Pa]$	tlak
$a$	$[m \cdot s^{-2}]$	zrychlení
$g$	$[m \cdot s^{-2}]$	gravitační zrychlení
$\xi$	$[-]$	ztrátový součinitel
$\tau$	$[Pa]$	tečné napětí



$\eta$	[Pa·s]	dynamická viskozita
$\omega$	[rad·s <sup>-1</sup> ]	kinematická viskozita
$L$	[m]	délka
$D$	[m]	velký průměr
$\varepsilon_{th}$	[m]	axiální vůle
$\beta$	[-]	parametr
$p$	[Pa]	tlak
$p_0$	[Pa]	tlak
$\phi$	[-]	nezávislá proměnná
$R$	[m]	průměr
$h$	[m]	výška
$U$	[m·s <sup>-1</sup> ]	obvodová rychlost
$\omega_i$	[-]	váha
$x$	[-]	všeobecný vstup
$\theta$	[-]	potenciál
$\varepsilon$	[-]	podnět neuronů
$Z$	[-]	Odezva
$\sec x$	[-]	$= 1/\cos x$
$\csc x$	[-]	$= 1/\sin x$



## SEZNAM PŘÍLOH

### Seznam obrázků:

Obr. 1 Responzní plocha zobrazující očekávaný výsledek ( $y$ ) jako funkci závislosti teploty ( $x_1$ ) a tlaku ( $x_2$ ) a obrysový (vrstevnicový) graf responzní plochy [29] .....	15
Obr.2 Princip aproximace radiální bázovou funkcí [38] .....	17
Obr.3 Interpolace pomocí radiální bázové funkce [39], upraveno .....	18
Obr.4 Schéma přeplňování motoru [44], upraveno .....	19
Obr.5 Průřez turbodmychadlem [44] .....	20
Obr.6 Turbínová skříň s wastegate a pneumatickým aktuátorem.[50] .....	22
Obr.7 Variabilní geometrie [52] .....	22
Obr. 8 Možné konfigurace ložiskového systému turbodmychadla [54] .....	23
Obr. 9 270° a 360° axiální ložisko [80][59] .....	24
Obr.10 Mazací systém turbodmychadla [63], upraveno .....	25
Obr.11 Dráha částice a Proudnic částice [65] .....	27
Obr.12 Laminární a turbulentní proudění [66] .....	28
Obr.13 Rychlostní profil v potrubí a hydraulický odpor [66] .....	28
Obr.14 Hydrodynamické mazání radiálního ložiska [68], upraveno .....	31
Obr.15 Mezera mezi rotující součástí a plochou[69] .....	32
Obr.16 Vývoj axiálního ložiska [68] .....	36
Obr. 17 Umístění a vyvážení axiálního ložiska [75], upraveno .....	38
Obr. 18 Postavení "padů" na ložisku a hlavní rozměry jednoho padu [74][75] .....	39
Obr.19 Definice okrajových podmínek na „padu“ [68] .....	40
Obr. 20 Převedení bodů na "padu" na čtvercovou síť, postup výpočtu matice tlaků a třecích ztrát. [74][75] .....	40
Obr. 21 Vývojový diagram výpočtového modelu [Vlastní zdroj] .....	41
Obr. 22 Návrhový prostor UFP 10x10), vykreslení pomocí polynomu 2.(vlevo) a 10. řádu (vpravo) [Vlastní zdroj] .....	44
Obr. 23 1. Iterace metamodelu, algoritmu PSA, lze pozorovat dominantní hledání extrému v ose $x$ . Drátový model označuje ideální funkci Rickerova vlna pro lepší vizuální ověření (ve 2D řezu černě) [Vlastní zdroj] .....	45
Obr. 24 2. Iterace metamodelu, algoritmu PSA, lze pozorovat dominantní hledání extrému v ose $y$ [Vlastní zdroj] .....	45
Obr. 25 3. Iterace metamodelu, algoritmu PSA, nalezení oblasti extrému v návrhovém prostoru [Vlastní zdroj] .....	46
Obr. 26 7. Iterace, determinační koeficient blízky 1 [Vlastní zdroj] .....	46



Obr. 27 Determinační koeficient v závislosti na počtu iterací [Vlastní zdroj] .....	48
Obr. 28 UFP 6x6, návrhový prostor a ukázka aproximace pro polynom řádu 4 [Vlastní zdroj].....	50
Obr. 29 Halton 64, návrhový prostor a ukázka aproximace pro polynom řádu 4 [Vlastní zdroj].....	50
Obr. 30 LHC 50, návrhový prostor a konturový graf pro nultou iteraci [Vlastní zdroj] .....	51
Obr. 31 LHC 50 3D Graf aproximace pro nultou iteraci [Vlastní zdroj].....	51
Obr. 32 LHC 30, návrhový prostor pro nultou iteraci a konturový graf pro nultou iteraci [Vlastní zdroj] .....	52
Obr. 33 LHC 30 3D Graf aproximace pro osmou iteraci [Vlastní zdroj] .....	52

### Seznam tabulek:

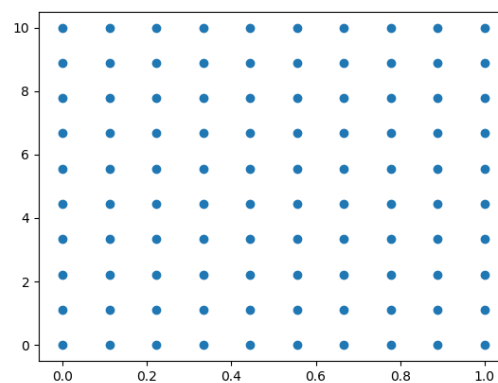
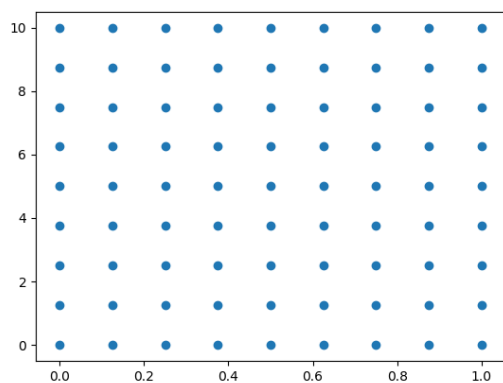
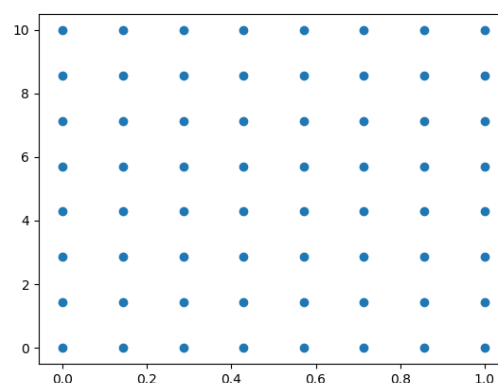
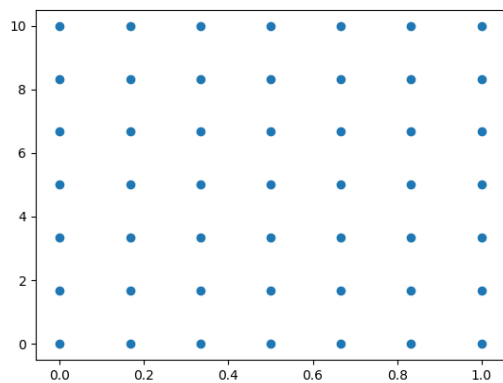
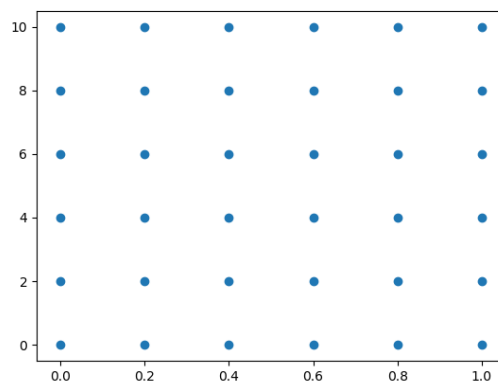
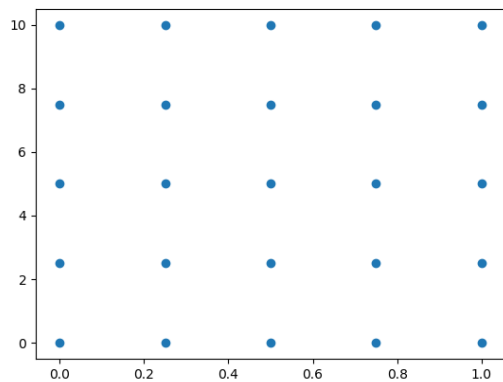
Tabulka 1 Techniky tvorby metamodelu [23] .....	13
Tabulka 2 Determinační koeficienty aproximace Rickerovy funkce pro 10 iterací. ....	46
Tabulka 3 Časový interval techniky kriging.....	46
Tabulka 4 Parametry techniky s použitím PSO .....	47
Tabulka 5 Parametry techniky s použitím GA.....	47
Tabulka 6 Parametry techniky pro vyšší počet iterací .....	48
Tabulka 7 Nalezené hodnoty optimalizovaných parametrů techniky Responzních ploch .....	49
Tabulka 8 Determinační koeficienty aproximace modelu pro UFP.....	49
Tabulka 9.....	50
Tabulka 10 Determinační koeficienty aproximace modelu pro UFP.....	50
Tabulka 11 Nalezené hodnoty optimalizovaných parametrů techniky kriging LHC 50, ITER 1 .....	51
Tabulka 12 Nalezené hodnoty optimalizovaných parametrů techniky kriging LHC 30, ITER 10 .....	52
Tabulka 13 Nezávislé proměnné získané přímou optimalizací genetického algoritmu .....	53

Příloha 1 – Vygenerované grafy *toolboxem PyCharm*



Návrhové prostory:

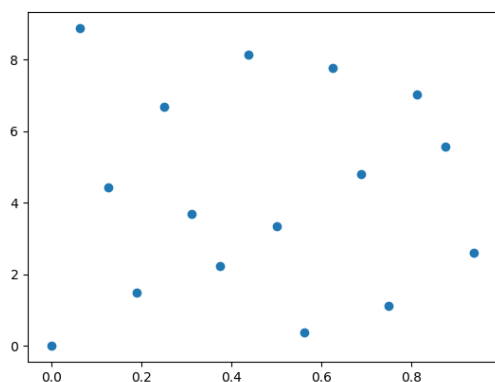
UFP – 5x5 až 10x10



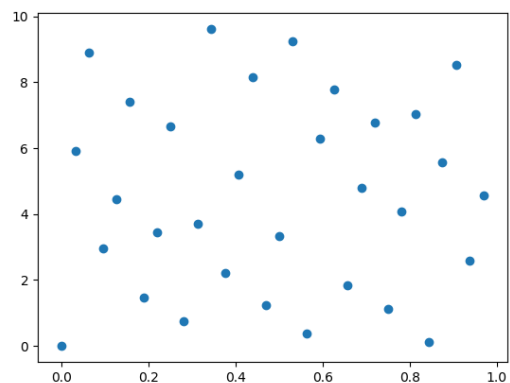


## Návrhové plány Halton 16 až Halton 256:

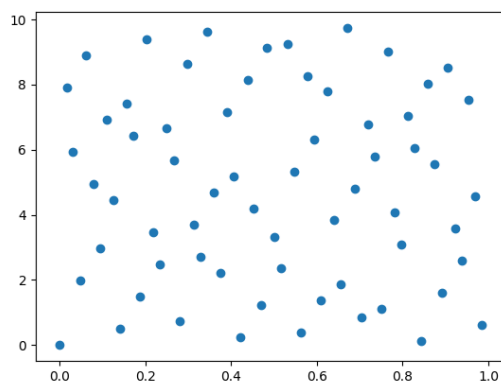
16



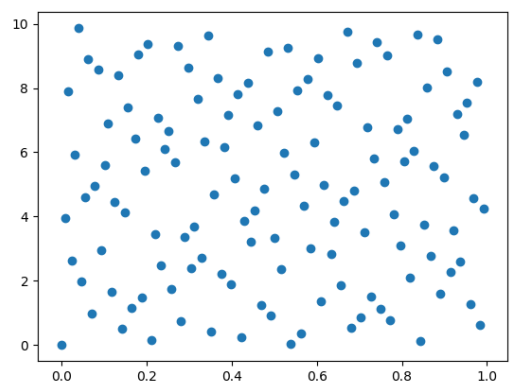
32



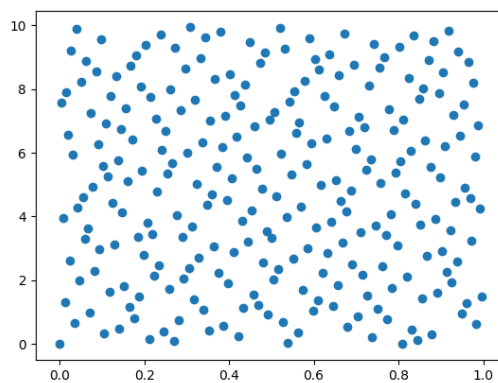
64



128



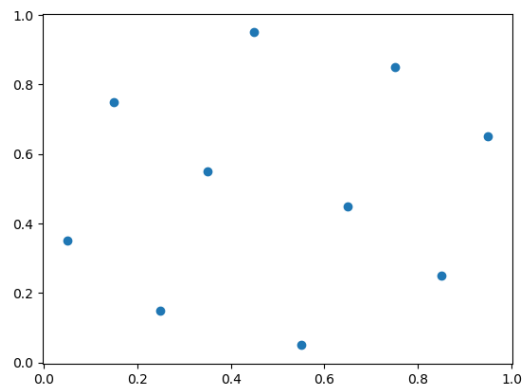
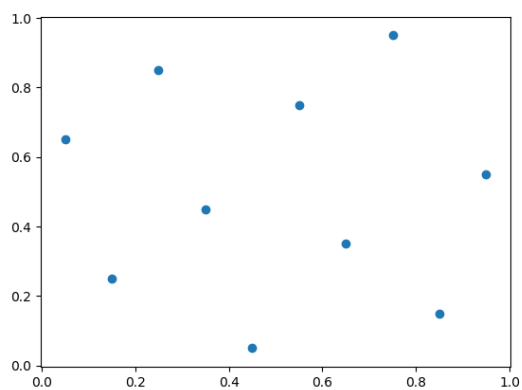
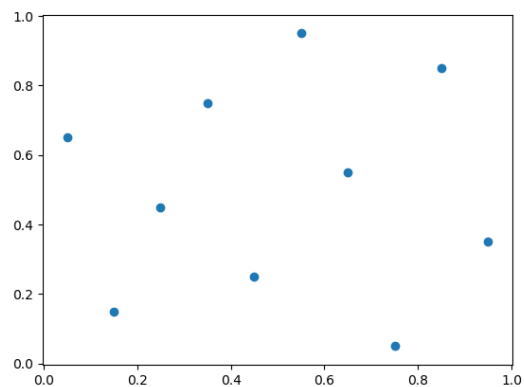
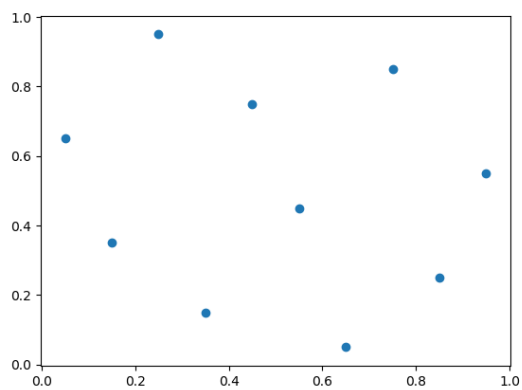
256



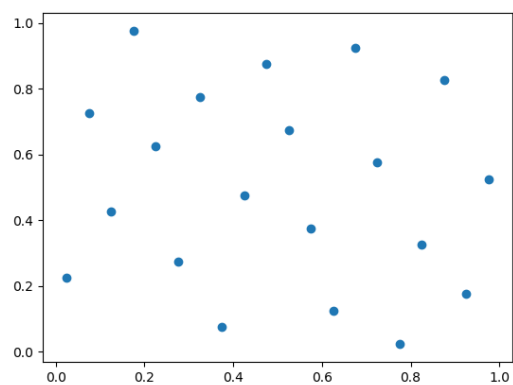
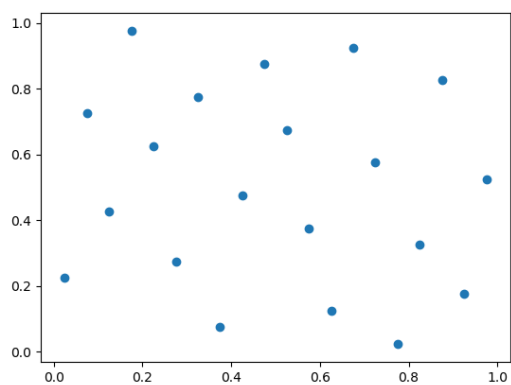


## Návrhové plány LHC:

## LHC 10



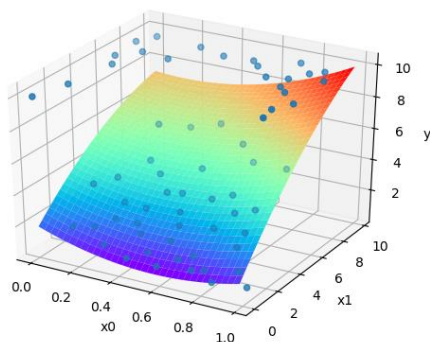
## LHC 20



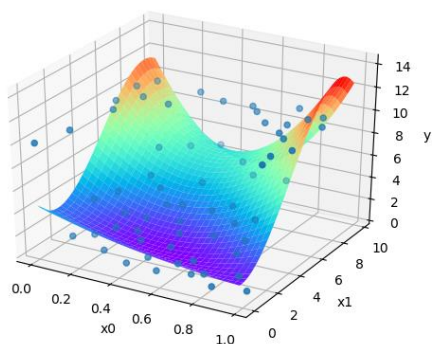


Výsledné grafy Halton 64:

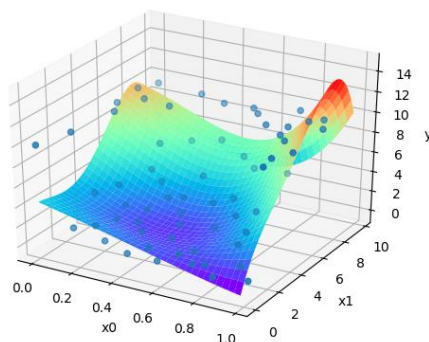
2.řád



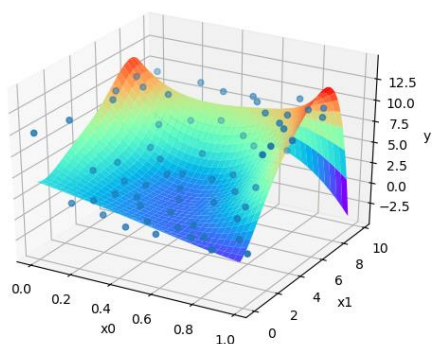
3.řád



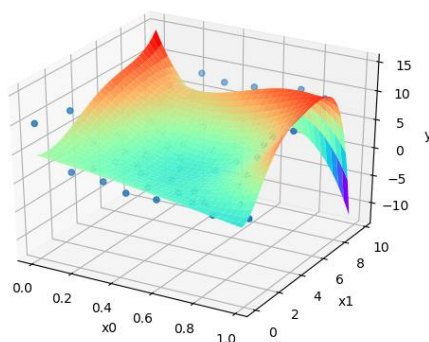
4.řád



5.řád



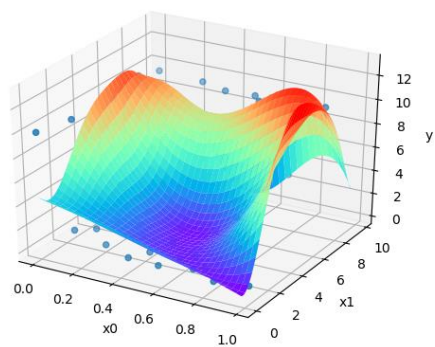
6.řád



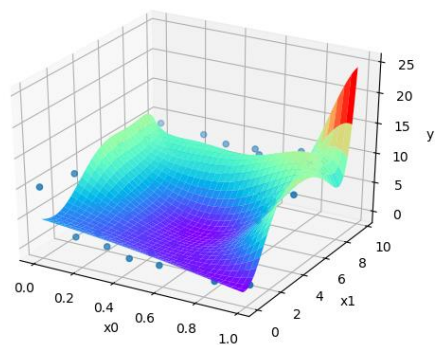




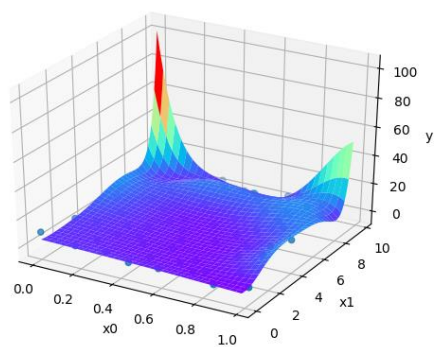
7.řád



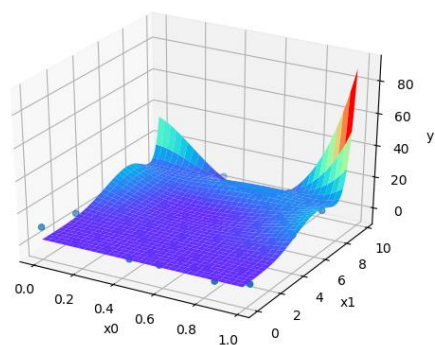
8.řád



9.řád



10.řád





## Kriging LHC 10 ITER2 PSO – Normalizováno logaritmicky

